



**TUGAS AKHIR TF 141581**

**PELACAKAN SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR  
BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA MENGGUNAKAN  
*HYDROPHONE ARRAY***

**SAPTIAN ALFUDI RAHMAN  
NRP. 2412 100 031**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng  
NIPN. 19731007 199802 1 001**

**Dr. Ir. Wirawan, DEA  
NIPN. 19631109 198903 1 011**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT TF 141581**

**LOCALIZATION OF UNDERWATER MOVING SOUND  
SOURCE BASED ON TIME DELAY ESTIMATION USING  
HYDROPHONE ARRAY**

**SAPTIAN ALFUDI RAHMAN  
NRP. 2412 100 031**

**Supervisor  
Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng  
NIPN. 19731007 199802 1 001**

**Dr. Ir. Wirawan, DEA  
NIPN. 19631109 198903 1 011**

**DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**

**PELACAKAN SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH  
AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA  
MENGUNAKAN *HYDROPHONE ARRAY***

**TUGAS AKHIR**

oleh:

**SAPTIAN ALFUDI RAHMAN  
NRP. 2412100031**

Surabaya, 20 Juli 2016

**Pembimbing I,**

**Pembimbing II,**



**Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng**  
NIPN. 19731007 199802 1 001



**Dr. Ir. Wirawan, DEA**  
NIPN. 19631109 198903 1 011



**Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D**  
NIPN. 19780902 200312 1 002

**PELACAKAN SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH  
AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA  
MENGUNAKAN *HYDROPHONE ARRAY***






**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Akustik dan Fisika Bangunan  
Program Studi S1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember  
oleh:

**SAPTIAN ALFUDI RAHMAN  
NRP. 2412100031**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Dhany Arifianto S.T., M.Eng
2. Dr. Ir. Wirawan, DEA
3. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc
4. Ir. Jerri Susatio, M.T.
5. Andi Rahmadiansah, S.T., M.T.

 (Pembimbing I)  
 (Pembimbing II)  
 (Ketua Penguji)  
 (Penguji II)  
 (Penguji III)

**Surabaya, Juli 2016**

# **PELACAKAN SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA MENGUNAKAN *HYDROPHONES ARRAY***

Nama Mahasiswa : Saptian Alfudi Rahman  
NRP : 2412100031  
Jurusan : Teknik Fisika FTI ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Dhany Arifianto, S.T., M. Eng  
Dr. Ir. Wirawan, DEA

## **ABSTRAK**

Pada penelitian ini dikembangkan pengukuran waktu tunda dari suatu hidrofon yang disusun secara *array* untuk pelacakan sumber bunyi bergerak bawah air. Pelacakan yang dimaksud adalah pembacaan posisi sudut relatif terhadap hidrofon *array*. Hal yang paling penting dalam melakukan pelacakan adalah perhitungan estimasi waktu tunda diantara susunan hidrofon yang berdampak pada akurasi pembacaan sudut suatu sumber yang dianggap sebagai target. Pada penelitian ini dilakukan analisa performa cross correlation (CC) dan cross correlation phase transform (PHAT) dalam mengestimasi waktu tunda dari dua sinyal dengan cara simulasi dan eksperimen. Simulasi dilakukan dengan cara mengkonvolusikan *impulse response* kolam tempat uji dengan sinyal uji yang telah diberikan waktu tunda. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa PHAT memiliki performa deteksi waktu tunda dengan benar pada kondisi SNR yang rendah. Kemudian dilakukan eksperimen dengan cara menempatkan 4 hidrofon *array* yang disusun secara linear (ULA) pada kolam. Terdapat dua macam percobaan yakni, sumber bunyi yang digerakkan secara diskrit dan secara kontinyu. Pada percobaan gerak diskrit, diperoleh besar penyimpangan sudut terhadap lokasi sebenarnya sebesar 0-9.2 derajat. Pada percobaan sumber bergerak, diperoleh bahwa pelacakan arah gerak dan posisi sudut sumber bunyi bergerak bawah air dapat dilakukan menggunakan estimasi waktu tunda menggunakan perhitungan PHAT. Secara umum metode PHAT mempunyai performa perhitungan yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode CC.

**Kata Kunci :** Waktu tunda, *cross correlation*, *cross correlation phase transform*, hidrofon *array*

# LOCALIZATION OF UNDERWATER MOVING SOUND SOURCE BASED ON TIME DELAY ESTIMATION USING HYDROPHONE ARRAY

Name : Saptian Alfudi Rahman  
NRP : 2412100031  
Department : Teknik Fisika FTI ITS  
Supervisor : Dr. Dhany Arifianto, S.T., M. Eng  
Dr. Ir. Wirawan, DEA

## ABSTRACT

*Time Difference of Arrival (TDOA) method has been widely used for sound source localization. We develops an underwater sound source localization method based on time delay estimation using hydrophones array. Tracking in this research is reading the angular position relative to the hydrophone array. The most important thing is time delay estimation between the hydrophones array that directly affect to the accuracy of localizes. In this paper, we analyze the performance of the generalized cross correlation (GCC) and generalized cross correlation with the phase transform (GCC-PHAT) weighting to estimate time delay between two signal by simulation with software and experiment in the pond. The simulation done by convolute tone signal that has been given time delay and impulse response of the pond, then the time delay of two signal estimated by GCC and GCC-PHAT algorithm in Matlab. Testing was conducted with various additional noise type, with various signal to noise ratio (SNR). From the simulation, GCC PHAT better than GCC because can detect correct time delay in the low SNR. The measurement were conducted by placing array of hydrophone (ULA) in the pond. Results of measurement shows that hydrophone array can localize angle of sound source at various angle, the best angle estimation get by using PHAT algorithm with error of 0-9.2 deg. In moving sources experiments, found that tracking the bearing of ship and angle of the underwater moving sound source can be done by using time delay estimation using PHAT calculation. In general PHAT method has better performance calculations than CC.*

**Key Words:** *Time delay, generalized cross correlation, generalized cross correlation phase transform, hydrophone array*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirrat Allah SWT atas rahmat-Nya sehingga laporan tugas akhir yang berjudul:

**“Pelacakan Sumber Bunyi Bergerak Bawah Air Berdasarkan Estimasi Waktu Tunda Menggunakan Hydrophones Array”**

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam pelaksanaan tugas akhir ini. Tanpanya penulis akan mengalami kendala dalam menyelesaikan beberapa persoalan yang terjadi. Beberapa pihak tersebut, tanpa dapat menyebutkan satu persatu adalah:

1. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh terhadap penyelesaian tugas akhir ini.
2. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Fisika ITS.
3. Dr. Dhany Arifianto, ST., M.Eng dan Dr. Ir. Wirawan, DEA selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan semangat dan ide-ide baru.
4. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di jurusan Teknik Fisika - ITS.
5. Ir. Sarwono, MM selaku dosen wali selama masa perkuliahan
6. Kepada kedua orang tua yang senantiasa memberikan dukungan moral maupun finansial.
7. Teman-teman F-47 seperjuangan TA yang telah memotivasi dan memberikan bantuan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.
8. Teman-teman Laboratorium Vibrasi dan Akustik yang namanya tidak bisa saya sebutkan satu-persatu
9. Juga teman-teman Solitong dan Torpedo Family
10. Teman sewarkop dan senasib: Salman, Jovi, Adip, dan Dhias.
11. Warkop ijo yang senantiasa memberikan inspirasi dan hiburan.

Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna perbaikan laporan tugas akhir ini. Semoga penelitian ini bermanfaat bagi kita semua. Terakhir, sedikit cuplikan dari hymne ITS yang selalu membuat penulis selalu termotivasi untuk menjadi orang yang lebih baik lagi “Jadi Pejuang Yang Takkan Kenal Letih Membangun Negeri, Hidup ITS- Hidup ITS Almamterku Jaya!” dan sebuah salam yang mempersatukan Mahasiswa Teknik Fisika ITS.

**Vivat TF! Vivat Solidarity, Together Forever!**

Surabaya, 13 Juni 2016  
Penulis,

Saptian Alfudi Rahman  
2411200031



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN I</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN II</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRAK</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xv</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
 <b>BAB II DASAR TEORI</b>	
2.1 Perambatan Suara Bawah Air	5
2.2 Hidrofon <i>Array</i>	7
2.3 <i>Impulse Response</i>	12
2.4 Estimasi Waktu Tunda	14
2.5 Algoritma Estimasi Waktu Tunda	15
2.6 Koefisien Korelasi	19
2.7 Triangulasi	21
2.8 Bearing dan Azimut	23
 <b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Pengukuran Keterarahan Hidrofon	25
3.2 Pengukuran Keterarahan <i>Underwater Speaker</i>	26
3.3 Pengukuran Kecepatan Suara Bawah Air	27
3.4 Pengukuran <i>Impulse Response</i>	29
3.5 Simulasi Estimasi Waktu Tunda	31
3.6 Pelacakan Posisi Sumber Suara di Udara	32
3.7 Pelacakan Posisi Sumber Suara di Air	34

3.8 Pengolahan Data Menggunakan CC dan GCC-PHAT	37
---	----

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Hasil Pengukuran Pola Keterarahan Hidrofon	39
4.2 Hasil Pengukuran Keterarahan <i>Underwater Speaker</i>	40
4.3 Simulasi Pola Keterarahan Hidrofon <i>Array</i>	41
4.4 Hasil Pengukuran Kecepatan Suara Bawah Air	43
4.5 Hasil Pengukuran <i>Impulse Response</i>	45
4.6 Hasil Simulasi Estimasi Waktu Tunda	48
4.7 Hasil Pelacakan Posisi Sumber Suara di Udara	51
4.8 Hasil Pelacakan Posisi Sumber Suara di Air	57
4.9 Pembahasan	71

#### **BAB VI PENUTUP**

5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	75

#### **DAFTAR PUSTAKA**

#### **LAMPIRAN**

#### **BIODATA PENULIS**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Lokasi referensi perhitungan pengurangan energi transmisi	6
<b>Gambar 2.2</b>	Konfigurasi sensor <i>array</i> terhadap <i>planewave</i> sumber bunyi	8
<b>Gambar 2.3</b>	Respon pengaruh sudut datang terhadap <i>gain</i> hidrofon pada <i>beamforming</i>	9
<b>Gambar 2.4</b>	<i>Uniform linear array</i> dengan 4 hidrofon	9
<b>Gambar 2.5</b>	Pemodelan <i>beamforming</i>	11
<b>Gambar 2.6</b>	Sistem linear time invariant	12
<b>Gambar 2.7</b>	Langkah ekstraksi <i>impulse response</i>	13
<b>Gambar 2.8</b>	Geometri estimasi waktu tunda	15
<b>Gambar 2.9</b>	Algoritma generalized cross correlation <i>time-delay estimation</i>	17
<b>Gambar 2.10</b>	Blok diagram generalized cross correlation <i>time-delay estimation</i>	17
<b>Gambar 2.11</b>	Ilustrasi koefisien korelasi menggunakan plot <i>scattering</i>	21
<b>Gambar 2.12</b>	Triangulasi empat hidrofon untuk penentuan sudut sumber	22
<b>Gambar 2.13</b>	Azimuth dan bearing	23
<b>Gambar 3.1</b>	Skema pengukuran keterarahan <i>underwater speaker</i>	25
<b>Gambar 3.2</b>	Skema pengukuran keterarahan hidrofon	26
<b>Gambar 3.3</b>	Kolam tampak atas	27
<b>Gambar 3.4</b>	Kolam tampak 3D	28
<b>Gambar 3.5</b>	Skema pengambilan data cepat rambat bunyi empirik tampak atas	29
<b>Gambar 3.6</b>	Spektrum sinyal ESS dan <i>inverse filter</i>	29
<b>Gambar 3.7</b>	Skema pengambilan data <i>impulse response</i> tampak atas	30
<b>Gambar 3.8</b>	Diagram alir simulasi estimasi waktu tunda	31
<b>Gambar 3.9</b>	Pencarian medan bebas di udara (tampak atas)	33

<b>Gambar 3.10</b>	Diagram alir proses perekaman dan pengolahan estimasi sudut sumber bunyi di udara (tampak samping)	34
<b>Gambar 3.11</b>	Skenario pelacakan posisi sumber suara diskrit dengan lintasan setengah lingkaran	36
<b>Gambar 3.12</b>	Skenario pelacakan posisi sumber suara diskrit dan bergerak dengan lintasan lurus	36
<b>Gambar 3.13</b>	Kapal selam <i>remote control</i> yang digunakan sebagai objek deteksi yang bergerak	37
<b>Gambar 4.1</b>	Pola keterarahan hidrofon 1	39
<b>Gambar 4.2</b>	Pola keterarahan <i>underwater speaker</i>	40
<b>Gambar 4.3</b>	Pola keterarahan <i>linear array</i> dengan empat hidrofon di udara	41
<b>Gambar 4.4</b>	Pola keterarahan <i>linear array</i> dengan empat hidrofon di air	42
<b>Gambar 4.5</b>	Sinyal keluaran $M=4$ hidrofon <i>array</i> dalam air ketika (a) mengarah pada sudut 0 derajat (b) mengarah pada sudut 90 derajat	43
<b>Gambar 4.6</b>	Waktu tunda antara hidrofon 1 dan hidrofon 2	43
<b>Gambar 4.7</b>	Sinyal ESS $s(t)$ , sinyal rekaman ESS $r(t)$ , dan invers filter ESS $f(t)$	45
<b>Gambar 4.8</b>	Konvolusi sinyal hasil pengukuran impulse response $h(t)$ dengan sinyal wicara $x(t)$	46
<b>Gambar 4.9</b>	Spektrogram sinyal terekam	46
<b>Gambar 4.10</b>	Spektrogram sinyal hasil konvolusi	47
<b>Gambar 4.11</b>	Hasil korelasi sinyal terekam dan sinyal hasil konvolusi.	47
<b>Gambar 4.12</b>	Hasil autokorelasi sinyal terekam	48
<b>Gambar 4.13</b>	Sinyal uji sebelum dikonvolusi	48

<b>Gambar 4.14</b>	Sinyal uji sebelum dikonvolusi dengan <i>impulse response</i>	48
<b>Gambar 4.15</b>	Pengaruh SNR terhadap estimasi waktu tunda ( <i>brownnoise</i> )	49
<b>Gambar 4.16</b>	Pengaruh SNR terhadap estimasi waktu tunda ( <i>pinknoise</i> )	49
<b>Gambar 4.17</b>	Pengaruh SNR terhadap estimasi waktu tunda ( <i>whitennoise</i> )	50
<b>Gambar 4.18</b>	Pembacaan puncak menggunakan CC dan PHAT	50
<b>Gambar 4.19</b>	Grafik pengaruh jarak terhadap TTB pada proses pencarian medan bebas di udara	52
<b>Gambar 4.20</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di luar ruangan	53
<b>Gambar 4.21</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di luar ruangan	53
<b>Gambar 4.22</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di dalam ruangan	55
<b>Gambar 4.23</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di dalam ruangan	55
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di kolam (lintasan setengah lingkaran)	58
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di kolam (lintasan setengah lingkaran)	58
<b>Gambar 4.26</b>	Estimasi waktu tunda menggunakan CC	60
<b>Gambar 4.27</b>	Estimasi waktu tunda menggunakan PHAT	60
<b>Gambar 4.28</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di kolam (lintasan lurus)	61
<b>Gambar 4.29</b>	Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di kolam (lintasan lurus)	62

<b>Gambar 4.30</b>	Grafik spektrum bunyi kapal <i>remote control</i> (a) di kolam Teknik Fisika (b) di kolam MOB LHI	63
<b>Gambar 4.31</b>	Skenario 1 (a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 1 dan 2 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 1 dan 2	64
<b>Gambar 4.32</b>	Skenario 1 (a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 2 dan hidrofon 3 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 2 dan 3	64
<b>Gambar 4.33</b>	Skenario 1 (a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 3 dan hidrofon 4 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 3 dan 4	65
<b>Gambar 4.34</b>	Lintasan kapal yang terlacak oleh hidrofon <i>array</i> (Skenario 1)	66
<b>Gambar 4.35</b>	Skenario 2 (a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 1 dan hidrofon 2 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 1 dan 2	68
<b>Gambar 4.36</b>	Skenario 2 (a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 2 dan hidrofon 3 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 2 dan 3	68
<b>Gambar 4.37</b>	Skenario 2 (a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 3 dan hidrofon 4 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 3 dan 4	68
<b>Gambar 4.38</b>	Lintasan kapal yang terlacak oleh hidrofon array (Skenario 2)	69
<b>Gambar 4.39</b>	Distribusi data sinyal uji pasangan hidrofon 2-3 (a) Sinyal simulasi (b) Sinyal pada sudut 900 (c) Sinyal pada sudut 600 (d) Sinyal pada sudut 300	71

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Persamaan empiris untuk menghitung kecepatan suara bawah air	7
<b>Tabel 2.2</b>	Konversi Azimut/sudut menjadi bearing	24
<b>Tabel 4.1</b>	Standar deviasi pengukuran tingkat tekanan bunyi pada hidrofona	40
<b>Tabel 4.2</b>	Standar deviasi pengukuran tingkat tekanan bunyi pada <i>underwater speaker</i>	41
<b>Tabel 4.3</b>	Nilai cepat rambat bunyi empirik	44
<b>Tabel 4.4</b>	Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di luar ruangan dengan lintasan setengah lingkaran (dalam derajat)	54
<b>Tabel 4.5</b>	Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di dalam ruangan dengan lintasan setengah lingkaran (dalam derajat)	56
<b>Tabel 4.6</b>	Pencarian medan bebas (frekuensi referensi = 1000 Hz)	57
<b>Tabel 4.7</b>	Tingkat tekanan bunyi referensi sinyal uji jarak 1 meter (1000 Hz)	57
<b>Tabel 4.8</b>	Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di kolam dengan lintasan setengah lingkaran (dalam derajat)	59
<b>Tabel 4.9</b>	Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di kolam dengan lintasan lurus (dalam derajat)	62
<b>Tabel 4.10</b>	Bearing terukur pada skenario 1	67
<b>Tabel 4.11</b>	Bearing terukur pada skenario 2	70

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Telah banyak dimanfaatkan sinyal akustik bawah air untuk identifikasi objek terutama objek yang bergerak di bawah air. Kemampuan sinyal akustik dalam hal perambatan dan atenuasi dalam air lebih baik lebih baik daripada gelombang elektromagnetik. Dibalik kemampuan tersebut, juga muncul kelemahan yang ditimbulkan akibat perambatan sinyal akustik. Seperti contoh yang terjadi pada dunia militer, perambatan sinyal akustik akibat bising mesin suatu objek kapal dapat dijadikan informasi penting untuk mendeteksi posisi objek tersebut. Keuntungan melakukan deteksi sumber bunyi jarak jauh adalah menghindarkan kontak fisik secara langsung dengan objek musuh sehingga informasi dapat diperoleh dengan cara yang lebih aman. Keberadaan suatu objek dalam air dapat dideteksi dari pancaran sinyal akustik yang dihasilkannya. Pancaran yang ditimbulkan mengalir dalam bentuk *flow array* sehingga dapat dideteksi pergerakannya dalam variabel frekuensi, *gain*, kecepatan, dan tekanan didalamnya (Urlick, 1983). Dalam mendeteksi posisi dari sumber bunyi, terdapat berbagai macam metode yang salah satunya adalah estimasi waktu tunda. Estimasi waktu tunda memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode lain dalam mendeteksi posisi sumber bunyi seperti metode Capon's atau MUSIC yakni lebih sesuai digunakan untuk tipe sinyal *broadband* seperti sinyal kapal (Sherman, 2007).

Penentuan sudut datang sumber bunyi bawah air bisa diperoleh berdasarkan estimasi waktu tunda menggunakan beberapa sensor hidrofons yang didistribusikan secara spasial (*array*), sehingga mampu menangkap sinyal suara yang datang (Khaddour, 2011). Nilai waktu tunda yang didapat kemudian dikonversi menjadi nilai sudut datang sumber bunyi relatif terhadap posisi hidrofons *array*. Metode yang paling dasar dan paling mudah untuk mengestimasi waktu tunda adalah cross



correlation (CC) (Iannielio, 1982). Metode CC mengasumsikan sinyal yang dikorelasikan merupakan sinyal yang merambat secara ideal, artinya tidak dipengaruhi oleh *noise* ataupun efek dengung dari suatu medium. Metode CC lebih cocok untuk estimasi waktu tunda pada medium dengan *noise* rendah dan terbebas dari efek dengung selain itu kompleksitas komputasi yang rendah menjadikan metode ini menjadi sering digunakan. Adapaun metode lain yang berasal dari perbaikan metode CC yakni metode generalized cross correlation dengan pembobot phase transform (GCC PHAT) (Knapp, 1976). Metode ini menggunakan pembobot sebagai *pre-filter* untuk meningkatkan estimasi waktu tunda pada lingkungan yang memiliki *noise*. Tetapi metode ini mempunyai tingkat kompleksitas perhitungan yang lebih tinggi dibandingkan metode CC.

Karakteristik propagasi bunyi dalam air sangat kompleks dan sangat terkait dengan efek pantulan, waktu dengung, dan perubahan volume medium akibat pergerakan suatu sumber bunyi. Menggunakan metode PHAT akurasi estimasi waktu tunda dapat ditingkatkan pada semua jenis sinyal, baik *narrowband* ataupun *broadband*. Seperti penelitian yang pernah dilakukan oleh (Zetterberg, 2005) bahwa metode PHAT dapat digunakan untuk melacak suatu sumber bunyi yang bergerak di laut bebas dengan sangat baik. Pada penelitian tersebut medium yang digunakan sangatlah luas sehingga mampu mengurangi efek pantulan, waktu dengung, dan perubahan volume medium akibat pergerakan suatu sumber bunyi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian tentang pelacakan posisi suatu sumber bunyi bergerak bawah air pada kolam sehingga efek pantulan ataupun bising pada lingkungan dapat diketahui. Metode CC dan PHAT dipilih untuk estimasi waktu tunda dalam penelitian ini.

Dari permasalahan tersebut dilakukan penelitian yang berjudul “Pelacakan Sumber Bunyi Bergerak Bawah Air Berdasarkan Estimasi Waktu Tunda Menggunakan Hidrofon *Array*” sehingga diharapkan mampu diterapkan menjadi teknologi

militer untuk mendeteksi objek bersuara yang bergerak di bawah air.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dirumuskan beberapa permasalahan yang harus terjawab:

1. Bagaimana melacak sumber bunyi bergerak bawah air berdasarkan estimasi waktu tunda menggunakan hidrofon *array*?
2. Bagaimana performansi estimasi waktu tunda menggunakan perhitungan cross correlation (CC) dan generalized cross correlation phase transform (PHAT)?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat melacak sumber bunyi bergerak bawah air berdasarkan estimasi waktu tunda menggunakan hidrofon *array*.
2. Dapat menganalisis performansi estimasi waktu tunda menggunakan perhitungan cross correlation (CC) dan generalized cross correlation phase transform (PHAT).

## 1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan dan rumusan masalah, akan diberikan beberapa batasan permasalahan dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Pengambilan data dilakukan di kolam Jurusan Teknik Fisika ITS dengan dimensi 8.8 m, 5.5 m, 1.5 m.
2. Sumber bunyi yang dideteksi dihasilkan oleh kapal selam RC merek Sea Wolf Remote Control Submarine dengan kecepatan konstan sebesar 0.28 m/s dan *underwater speaker* merk DARAVOC MA001 dengan frekuensi yang digunakan sebesar 200, 500, 800, 1000 Hz.

3. Kualitas air kolam dianggap homogen.
4. Variabel yang dideteksi adalah variabel sudut sumber bunyi relatif terhadap hidrofon *array*.
5. Perhitungan waktu tunda menggunakan algoritma CC dan PHAT menggunakan software Matlab.
6. Sumber bunyi yang digunakan berada pada daerah *far-field* sehingga sinyal yang datang ke sensor dianggap sebagai muka gelombang planar.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Perambatan Suara Bawah Air

Suara terdiri dari gerak beraturan dari molekul suatu zat elastik yang merambat ke segala arah. Gerakan partikel dari materialnya seperti gerakan yang dibangkitkan oleh proyektor suara, dirambatkan terhadap partikel terdekat dalam hal ini adalah fluida. Dalam fluida, gerakan partikel merapat dan merenggang searah dengan arah rambat; karena fluida dapat dimampatkan, perenggangan dan perapatan yang menyebabkan perubahan tekanan sehingga dapat dideteksi dengan *pressure-sensitive* hidrofona dan terbaca sebagai suatu gelombang. Perambatan gelombang akustik bawah air diturunkan dari persamaan state, persamaan kekekalan massa (persamaan kontinuitas) dan persamaan kekekalan momentum. Propagasi gelombang tersebut dinyatakan oleh persamaan berikut :

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Dimana :

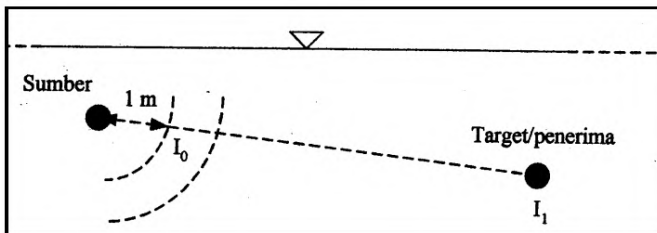
$p$	= Tekanan	(Pa)
$c$	= Kecepatan rambat gelombang suara	(m/s)
$t$	= Waktu	(s)
$x, y, z$	= Koordinat posisi	(m)

Radiasi suatu gelombang akustik mengalami pelemahan yang jauh lebih kecil dibanding cahaya dan gelombang radio ketika merambat pada medium air laut. Oleh karena itu, suara digunakan untuk berbagai tujuan dalam kegiatan eksplorasi laut (Urlick, 1983). Sebuah sinyal akustik yang merambat pada medium air akan mengalami pelemahan dan terdistorsi oleh beberapa mekanisme. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi transmisi suara bawah air. Faktor-faktor tersebut antara lain permukaan laut, dasar laut dan ketidakhomogenan

laut. Permukaan laut mempengaruhi transmisi yang mengakibatkan adanya refleksi (pantulan) di permukaan air (Urick, 1983). *Transmission loss* atau rugi transmisi didefinisikan sebagai hilangnya intensitas (daya per unit area) dalam desibel (dB) antara tempat tujuan dan jarak referensi (biasanya 1 meter atau 1 yard). Dengan  $I_0$  adalah intensitas pada jarak referensi, rugi transmisi sebagai TL atau  $N_w$ , pada jarak  $R$ , dan kedalaman  $D$ , dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$TL = N_w = -10 \log \left( \frac{I(R, D)}{I_0} \right) = -20 \log \left( \frac{|p(R, D)|}{|p_0|} \right) \quad (2.2)$$

Pengurangan energi transmisi merupakan jumlah kehilangan energi akibat penjarangan (*spreading*) dan pelemahan (*attenuation loss*) suara. *Spreading loss* merupakan efek geometri yang menandakan pelemahan sinyal suara karena suara tersebut menjalar menjauhi sumber suara. *Attenuation loss* dapat terjadi karena absorpsi (*absorption*), pemantulan (*reflection*), dan kebocoran suara (*leakage*) dari kanal suara (Urick, 1983).



**Gambar 2.1** Lokasi referensi perhitungan pengurangan energi transmisi.

Kecepatan suara di bawah air menentukan banyak perilaku propagasi suara bawah air. Secara empiris kecepatan suara  $c$  merupakan fungsi dan temperatur  $T$ , salinitas  $S$  dan kedalaman  $z$ . Kecepatan suara ini bervariasi tergantung pada lokasi geografisnya. Variasi kecepatan suara terhadap kedalaman dinamakan *Sound Velocity Profile* (SVP). SVP dapat diperoleh

dengan observasi hidrografi berupa pengukuran temperatur, salinitas dan kedalaman. Berikut ini adalah tiga persamaan empiris kecepatan suara yang hanya dipengaruhi oleh temperatur  $T$ , salinitas  $S$  dan kedalaman  $z$ , dimana tidak ada faktor lain yang mempengaruhinya baik itu kecepatan arus laut maupun faktor fisik lainnya. (Urlick, 1983).

Pada perairan tawar, salah satu faktor yang mempengaruhi propagasi suara bawah air adalah kedalaman. Faktor ini lebih dominan mempengaruhi kecepatan suara dalam air dibandingkan dengan salinitas maupun temperatur. Penambahan tekanan terhadap penambahan kedalaman relatif konstan dan dapat diperhitungkan/ diprediksi. Penambahan kedalaman setiap 1 meter akan menambah kecepatan suara hingga mencapai 0,017 meter/ detik

**Tabel 2.1** Persamaan empiris untuk menghitung kecepatan suara bawah air

Persamaan Empiris Kecepatan Suara	Persamaan
Leroy	$c = 1492.9 + 3(T-10) - 6 \cdot 10^{-3}(T-10)^2 + 1.2(S-35) - 10^{-2}(T-18)(S-35) + z/61$
Medwin	$c = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.9 \cdot 10^{-4}T^3 + (1.34 \cdot 10^{-2})(S-35) + 1.6 \cdot 10^{-2}z$
Mackenzie	$c = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.374 \cdot 10^{-4}T^3 + 1.34(S-35) + 1.63 \cdot 10^{-2}z + 1.675810^{-7}z^2 - 1.025 \cdot 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \cdot 10^{-13}Tz^3$

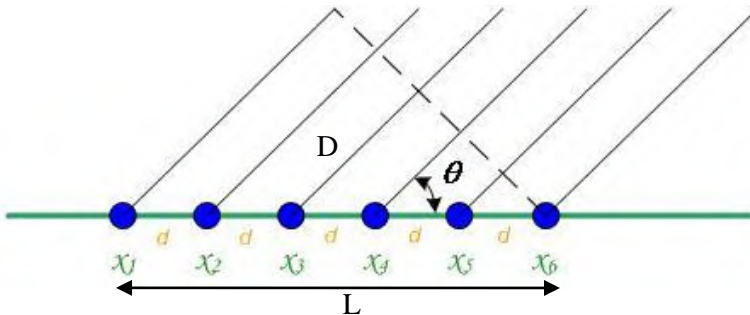
## 2.2 Hidrofon Array

Hidrofon adalah suatu *transducer* yang mendeteksi perubahan tekanan dari suatu sinyal akustik bawah air dan mengubahnya menjadi bentuk tegangan yang nilainya sebanding dengan tekanan yang diterima (Sherman, 2007). Hidrofon *array* merupakan susunan 2 hidrofon atau lebih yang digunakan untuk menangkap sinyal yang dibawa oleh gelombang suara. Pada

teknik penggunaan hidrofon *array*, susunan sejumlah hidrofon pada dasarnya menyuplik medan suara pada titik yang berbeda pada suatu ruang. Sesuai dengan teorema sampling bahwa aliasing juga terjadi pada domain frekuensi jika sinyal sampling tidak memenuhi kriteria nyquist.

Pertimbangan yang sama ketika kita menganalisis spektrum dari frekuensi spasial. Kriteria nyquist ekuivalen dengan rata-rata sampling untuk menghindari *spatial aliasing* secara tidak langsung jarak antar sensor  $d$  harus kurang dari atau sama dengan setengah minimum panjang gelombang, dimana minimum panjang gelombang ini berkaitan dengan frekuensi maksimum dari sumber (Sherman, 2007).

$$d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2.3)$$



**Gambar 2.2** Konfigurasi sensor *array* terhadap *planewave* sumber bunyi

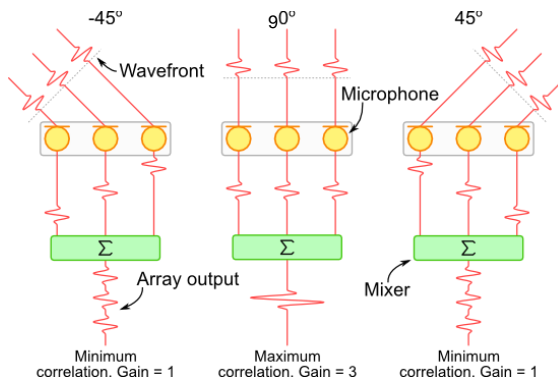
Dimana  $d$  adalah jarak antar sensor,  $\lambda$  adalah panjang gelombang,  $c$  adalah kecepatan gelombang diudara dan  $f$  adalah frekuensi maksimum dari sumber dalam satuan Hz. Sedangkan asumsi gelombang yang datang berupa *planewave*, hal ini terjadi jika jarak sumber terhadap sensor cukup jauh (*far field*). Medan jauh didefinisikan sebagai wilayah dimana bentuk sinyal tidak berubah

terhadap jarak. Pada medan jauh, tingkat tekanan bunyi berlaku hukum kuadrat terbalik (tingkat tekanan bunyi berkurang 6 dB pada kelipatan dua kali jarak dari sumber). Berdasarkan pendekatan dari franhoufer pada gejala optis, pengaturan jarak sumber terhadap sensor dapat ditentukan melalui persamaan 2.4 (McCowan, 2001).

$$D \geq \frac{2 \cdot L^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

Dimana  $D$  adalah jarak sumber terhadap sensor dalam satuan meter,  $L$  adalah panjang *array* sensor dalam satuan meter dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang dari sumber.

Keuntungan menggunakan hidrofon *array* daripada satu hidrofon sebagai penangkap sinyalnya adalah memperbesar gain sehingga keterarahan lebih bagus dan *noise* yang diterima lebih diperkecil seperti **Gambar 2.3**. Terdapat pengaruh yang signifikan dari jumlah penyusun hidrofon *array*. Semakin banyak jumlah hidrofon yang dipakai dalam hidrofon *array*, kualitas penangkapan suaranya lebih bagus.

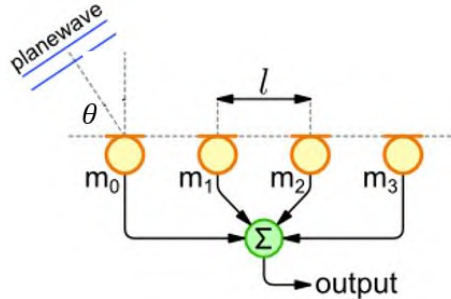


**Gambar 2.3** Respon pengaruh sudut datang terhadap gain hidrofon pada beamforming (Andrew, 2012)

Dalam susunan hidrofon *array*, terdiri dari linear *array* dan nonlinear *array*. Linier *array* adalah susunan suatu hidrofon baik



dari kanan ke kiri atau dari atas kebawah dengan jarak antar hidrofon yang sama. Hidrofon *array* pada susunan **Gambar 2.4** adalah hidrofon dengan spesifikasi sama dan jarak antar hidrofon sama.



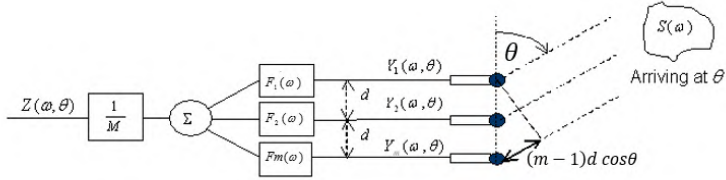
**Gambar 2.4** Uniform linear array dengan 4 hidrofon (Andrew, 2012)

Linear *array* memiliki tingkat sensitifitas berbeda-beda sesuai dengan jumlah hidrofon penyusunnya. Hal itu dapat diilustrasikan seperti **Gambar 2.4**. Pada **Gambar 2.4** menunjukkan *pole* pada ujung ujung horizontal adalah sudut  $90^0$ . Dari **Gambar 2.4** dapat dijelaskan bahwa sensitifitas terbesar pada sudut  $90^0$ . Hal ini dikarenakan posisi hidrofon yang linier secara horizontal. Dalam hidrofon *array*, salah satu parameter pentingnya adalah keterarahan (*directivity*) (Sherman, 2007).

$$output = 20\log_{10} \left( \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} e^{\frac{j.2\pi.f.i.l.\cos(\theta)}{c}} \right) \quad (2.5)$$

Persamaan diatas menunjukkan *output* dari suatu hidrofon array berdasarkan fungsi  $\theta$ , jika output semakin besar maka artinya pembacaan hidrofon semakin sensitif.  $M$  adalah jumlah hidrofon,  $f$  adalah frekuensi sumber,  $d$  adalah jarak antar hidrofon,  $\theta$  adalah sudut datang sumber, dan  $c$  adalah kecepatan rambat bunyi dalam air. Karakteristik suatu sumber suara yang datang dari sudut tertentu dipengaruhi oleh pola keterarahan suatu hidrofon  $H(\omega, \theta)$

(filter spasial) yang merupakan fungsi sudut dan frekuensi seperti pada **Gambar 2.5**.



**Gambar 2.5** Pemodelan *beamforming* (Chandak, 2014)

Sinyal yang ditangkap oleh hidrofon  $y_m[k]$  adalah sinyal  $S(\omega)$  yang tertunda akibat adanya pengaruh spasial antara sumber dan sensor.

$$y_m[k] = s[k - \tau_m(\theta)] \quad (2.6)$$

Dimana,

$$Y_m(\omega, \theta) = e^{-j\omega\tau_m(\theta)} S(\omega) \quad (2.7)$$

$$\tau_m(\theta) = \frac{(m-1)d \cos \theta}{c} f_s \quad (2.8)$$

Kemudian, sinyal yang ditangkap masing-masing hidrofon dikumpulkan pada suatu vektor.

$$Y_m(\omega, \theta) = d(\omega, \theta) S(\omega) \quad (2.9)$$

$$d(\omega, \theta) = [1 \quad e^{-j\omega\tau_2(\theta)} \quad \dots \quad e^{-j\omega\tau_m(\theta)}]^T \quad (2.10)$$

Sehingga keluaran sinyal pada kasus  $M$  hidrofon array  $Z(\omega, \theta)$  adalah seperti berikut.

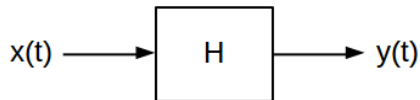
$$Z(\omega, \theta) = \sum_{m=1}^M F_m(\omega) Y_m(\omega, \theta) \quad (2.11)$$

Pada kasus sumber bunyi bergerak, perubahan nilai  $\theta$  mempengaruhi besarnya keluaran sinyal  $Z(\omega, \theta)$  pada hidrofon

array yang merupakan fungsi frekuensi dan sudut. Semakin sumber mendekati sensor maka nilai  $\theta$  semakin besar sehingga sinyal yang ditangkap juga semakin kuat.

### 2.3 Impulse Response

*Impulse response* adalah suatu atribut yang menggambarkan karakteristik *linear time invariant (LTI)* suatu sistem pada semua frekuensi. *Impulse response* menggambarkan perubahan perilaku keluaran terhadap perubahan sinyal masukan. Sebuah waktu kontinu sistem LTI digambarkan seperti **Gambar 2.6** berikut ini.



**Gambar 2.6** Sistem *linear time invariant*

Respon sistem yang dihasilkan berupa kurva yang menjadi dasar untuk menganalisa karakteristik sistem selain menggunakan persamaan/ model matematika. Bentuk kurva respon sistem dapat dilihat setelah mendapatkan sinyal input. Sinyal input yang diberikan untuk mengetahui karakteristik sistem disebut sinyal test. Ada 3 tipe input sinyal test yang digunakan antara lain: *impulse signal*, *step signal*, *ramp signal*.

Terdapat suatu teknik baru dalam pengukuran sinyal *impulse response*, yakni menggunakan *exponential sine sweep (ESS)*. ESS mempunyai keunggulan jika dibandingkan menggunakan *linear sine sweep* seperti metode MLS dan IRS. Metode ESS menggunakan sinyal *swept* sinusoidal yang berubah secara eksponensial untuk eksitasi kondisi ruangan dan dekonvolusi aperiodik untuk mengekstrak impulse respons dari respon ruangan yang terekam (Farina, 2000). Berikut keuntungan menggunakan metode ESS dibandingkan metode pengukuran IR yang lain, antara lain:

- Dapat mengabaikan *noise* dibandingkan metode MLS, dengan memberikan sinyal yang sama panjang

- Pemisahan yang mendekati sempurna dari efek nonlinier dari respon linear yang diinginkan dibandingkan dengan metode MLS. Hal ini disebabkan oleh metode ESS terbebas dari puncak-puncak palsu pada sinyal akibat distorsi ketika menggunakan metode MLS.
- Untuk sistem yang memiliki variansi waktu, seperti yang melibatkan propagasi suara di udara dapat menghilangkan kesalahan fase pada frekuensi tinggi
- Menghindari masalah time aliasing yang biasanya dialami oleh metode MLS akibat konvolusi linear yang aperiodik.

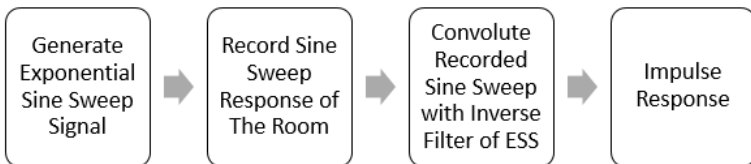
Sinyal ESS yang digunakan untuk eksitasi ruang dapat dinyatakan dalam domain waktu kontinu sebagai berikut:

$$s(t) = \sin[\theta(t)] = \sin\left[K \cdot \left(e^{-\frac{t}{L}} - 1\right)\right] \quad (2.12)$$

Dimana

$$K = \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)}, L = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)} \quad (2.13)$$

T adalah durasi dari sinyal *sweep*, yang berupa sinyal *sweep* sinusoidal yang terbatas pada frekuensi antara  $\omega_1$  dan  $\omega_2$ . Keuntungan menggunakan batas frekuensi adalah dapat menyesuaikan batas frekuensi kerja dari *speaker* dan hidrofons sehingga didapatkan hasil *impulse response* yang maksimal. Berikut diagram blok yang menjelaskan cara kerja ekstraksi *impulse response* menggunakan teknik ESS:



**Gambar 2.7** Langkah ekstraksi *impulse response*

Untuk mendapatkan suatu sinyal *impulse response*  $h(t)$  perlu dilakukan dekonvolusi terhadap sinyal acuan  $s(t)$ . Pada proses

ekstraksi *impulse response*, proses konvolusi antara sinyal terekam  $r(t)$  dan inverse filter  $f(t)$  disebut juga sebagai proses dekonvolusi.

$$h(t) = r(t) * f(t) \quad (2.14)$$

Persamaan diatas menggambarkan *impulse response* yang ideal, terlepas dari distorsi sinyal. Karena kita berhadapan dengan sistem fisik, maka selalu ada komponen *error/ noise* yang masuk sinyal terekam. Masalah terbesar terjadi akibat respon *speaker* yang tidak ideal selama proses pembangkitan suara (seperti distorsi suara pada frekuensi rendah) dan *noise* luar yang masuk selama proses perekaman. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Farina, distorsi harmonik selalu terjadi didepan sinyal *impulse response*, sehingga distorsi tersebut mudah ditemukan dan sinyal tersebut dapat dihilangkan dengan cara memotongnya tanpa mempengaruhi respon linear sinyal (Farina, 2000).

## 2.4 Estimasi Waktu Tunda

*Time delay/* waktu tunda adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu gelombang untuk mencapai titik terjauh dari sumber suara dimana perbedaan waktu dapat digunakan untuk melokalisasi sumber suara (Khaddour, 2011). Terdapat sebuah model sederhana yang menjelaskan penundaan waktu adalah ketika ada dua hidrofoni  $m_1$  dan  $m_2$ . Sinyal yang terestimasi dari hidrofoni diatas adalah sebagai berikut:

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \quad (2.15)$$

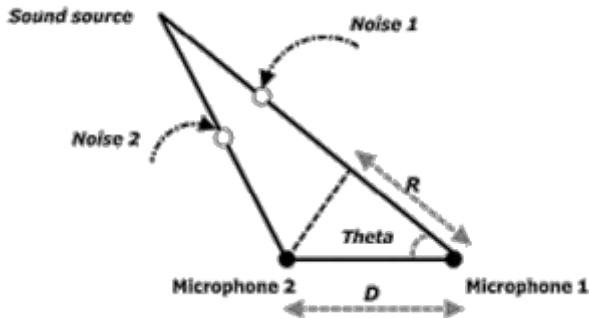
$$x_2(t) = as_1(t + d) + n_2(t) \quad (2.16)$$

Dimana  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  adalah sinyal yang ditangkap oleh sensor  $m_1$  dan  $m_2$ ;  $s_1(t)$  adalah sinyal suara yang ditransmisikan;  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  adalah *noise array* yang bersifat uncorrelated Gaussian. Sinyal sumber  $s(t)$  dan  $n(t)$  tidak saling berkorelasi sehingga ketika noise semakin tinggi maka  $s_1(t)$  dan  $s_2(t)$  juga semakin tidak berkorelasi. Akibatnya, noise yang masuk akan dianggap sebagai

suatu sinyal utama sehingga mempengaruhi perhitungan (Yushi, 2005).  $\alpha$  adalah faktor atenuasi bunyi yang merambat ke  $m_2$  relatif terhadap  $m_1$  dan  $d$  adalah perbedaan waktu tempuh antara  $m_1$  dan  $m_2$ . Ketika terdapat dua hidrofon yang digunakan maka dapat diestimasi waktu tunda berdasarkan perbedaan jarak tempuh propagasi gelombang bunyi. Dimana besarnya  $\theta$  didapatkan melalui persamaan berikut:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{R}{D} = \cos^{-1} \frac{c \Delta t}{D} \quad (2.17)$$

Dimana theta adalah sudut yang merujuk ke sumber suara,  $D$  adalah jarak antara dua hidrofon,  $c$  adalah kecepatan bunyi di udara pada 20 derajat Celcius di mana  $c = 343$  m/s dan  $\Delta t$  adalah waktu tunda.



**Gambar 2.8** Geometri estimasi waktu tunda (Khaddour, 2011)

## 2.5 Algoritma Estimasi Waktu Tunda

Beberapa algoritma telah dibuat untuk menghitung waktu tunda, dimana terdapat perbedaan dalam tingkat akurasi dan kompleksitas komputasi. Misalnya metode LMS adaptive filter, *cross power spectrum phase*, cross correlation (CC), dan generalized cross correlation (GCC) (Khaddour, 2011). Pada penelitian ini digunakan CC dan PHAT untuk mengestimasi waktu tunda.

### a. Cross correlation (CC)

Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperkirakan waktu tunda  $D$  adalah untuk menghitung Fungsi cross correlation antara sinyal yang diterima di dua hidrofon. Kemudian dicari puncak maksimum pada output yang merupakan estimasi waktu tunda (Lin, 2011).

$$x_i = a_i s(t - \tau_i) + n_i \quad (2.18)$$

$i$  menggambarkan hidrofon,  $s(t)$  adalah sinyal suara,  $n_i(t)$  adalah array,  $\tau_i$  adalah waktu tunda perambatan pada kedua hidrofon. Jika **Persamaan 2.19** di transformasi fourier maka akan didapatkan persamaan berikut:

$$x_1(\omega) = a_i s_i(\omega) e^{j\omega t} + N_i(\omega) \quad (2.19)$$

Fungsi *cross power spectrum density* dihitung melalui persamaan berikut:

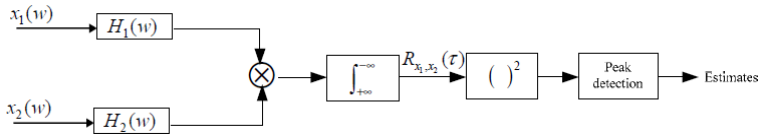
$$R_{12}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t - \tau)] \quad (2.20)$$

Waktu tunda dapat diestimasi dari  $R_{12}(\tau)$ :

$$\tau_{12} = \arg \max_{\tau \in D} R_{12}(\tau) \quad (2.21)$$

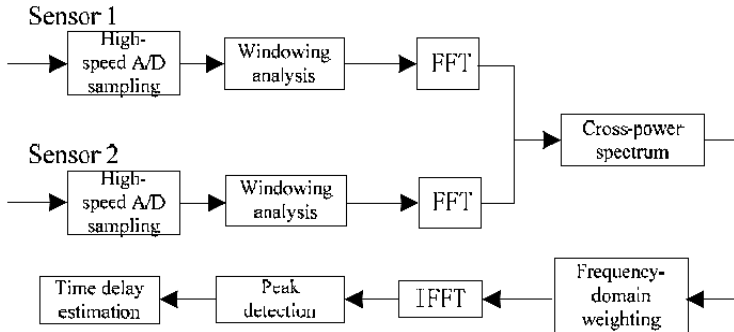
### b. Generalized Cross correlation

Algoritma ini merupakan versi perbaikan dari algoritma cross correlation. Keuntungan utama dari algoritma ini adalah tinggi akurasi dan tingkat komputasi yang rendah (Lin, 2011). Prinsip dasar dari fungsi GCC adalah untuk menentukan *cross power* antara dua jenis sinyal kemudian diberikan sebuah pembobot pada domain frekuensi. Kemudian dilakukan invers transform agar sinyal menjadi domain waktu kembali dan ditentukan fungsi cross correlation dimana dari korelasi maka didapatkan waktu tunda dari dua sinyal.



**Gambar 2.9** Algoritma generalized cross correlation *time-delay estimation* (Lin, 2011)

Pada cross correlation terdapat kekurangan yakni diasumsikan tidak adanya korelasi antara sinyal sumber dengan sinyal *array* sehingga semua sinyal sehingga dianggap sinyal sumber dan *array* dianggap sebagai satu kesatuan. Dalam prakteknya hal ini merugikan karena perhitungan puncak  $R_{12}(\tau)$  menjadi kurang jelas sehingga akurasi estimasi waktu tunda menjadi berkurang (Lin, 2011). Oleh karena itu dibutuhkan generalized cross correlation untuk memperlemah atau mengeleminasi efek *array* sehingga meningkatkan estimasi waktu tunda. Berikut blok diagram generalized cross correlation *time-delay estimation*.



**Gambar 2.10** Blok diagram generalized cross correlation *time-delay estimation* (Lin, 2011)

Pertama sensor 1 dan 2 menangkap sinyal akustik untuk diproses menjadi sinyal digital. Sebuah *movable finite-length window* digunakan untuk *framing* untuk proses transformasi fourier sinyal agar mendapatkan *cross-power spectrum* dari dua sinyal (Lin, 2011). Setelah itu dilakukan pembobotan domain frekuensi



terhadap power cross spectrum sesuai bobot tertentu. Kemudian fungsi *frame* cross correlation diinvers fourier transform dan  $\tau$  sesuai dari puncak cross correlation yang fungsinya ditentukan melalui deteksi puncak yang merupakan waktu tunda antara dua sensor (Lin, 2011).

### c. Generalized Cross correlation-Phase transform (GCC-PHAT)

Berdasarkan hubungan antara cross correlation dan cross power spectrum, dapat diperoleh persamaan berikut:

$$R_{12}(\tau) = \int_0^{\pi} G_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.22)$$

Dimana  $G_{12}(\omega)$  adalah cross-spectrum  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  sinyal yang ditangkap oleh sensor  $m_1$  dan  $m_2$ .

$$\begin{aligned} G_{12}(\omega) = & \alpha_1 \alpha_2 S_1(\omega) S_2(\omega) e^{-j\omega(\tau_2 - \tau_1)} \\ & + \alpha_2 S_2(\omega) N_1(\omega) + \\ & \alpha_1 S_1(\omega) e^{-j\omega\tau_1} N_2(\omega) + N_1(\omega) N_2(\omega) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Dengan melihat *cross-power spectrum* antara 2 sinyal dan kemudian memberikan pembobotan/ *weighting* yang sesuai pada domain frekuensi, metode GCC melakukan proses *whitening* terhadap sinyal dan *array* sehingga meningkatkan komponen frekuensi dengan SNR yang lebih tinggi dan menghambat menghambat efek dari *array*. Terakhir dilakukan invers transform ke domain waktu sehingga didapatkan fungsi GCC dari 2 sinyal:

$$R_{12}^g(\tau) = \int_0^{\pi} \psi_{12}(\omega) G_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.24)$$

Dimana  $\Psi_{12}(\omega)$  adalah fungsi pembobot GCC. Pemilihan fungsi pembobot tergantung pada 2 aspek: *array* dan kondisi reflektansi dari sumber suara. Tujuan dari penggunaan fungsi pembobot adalah untuk membuat  $R_{12}(\tau)$  memiliki puncak relatif yang tajam sehingga memudahkan estimasi waktu tunda. Puncak

$R_{12}(\tau)$  adalah waktu tunda antara 2 sensor. Pembobotan sangat penting dilakukan untuk mendapatkan nilai SNR yang tinggi hal ini didasarkan pada kondisi lapangan, dimana kehadiran faktor seperti *echo* maupun waktu dengung yang datang dari berbagai sisi dapat menurunkan nilai SNR (Xiaofei, 2012). Fungsi cross correlation akan menghitung puncak dari sinyal utama dan sinyal pantulan sehingga estimasi waktu tunda akan sulit untuk dilakukan pada nilai SNR yang rendah. Oleh karena itu dibutuhkan suatu pembobot  $\Psi_{12}(\omega)$  untuk menekan efek *array* dan waktu dengung. Terdapat beberapa jenis pembobot antara lain CC, ROTH, SCOT, PHAT. GCC tipe PHAT (Phase transform) adalah jenis pembobot yang paling umum digunakan dengan persamaan berikut (Lin, 2011):

$$\Psi_{12}(\omega) = \frac{1}{|G_{12}(\omega)|} \quad (2.25)$$

Kemudian dilakukan invers transform ke domain waktu sehingga didapatkan fungsi GCC PHAT dari 2 sinyal:

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{12}(\omega) G_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.26)$$

Waktu tunda dapat diestimasi dari  $R_{12}(\tau)$ :

$$\tau_{12} = \arg\max_{\tau \in D} R_{12}(\tau) \quad (2.27)$$

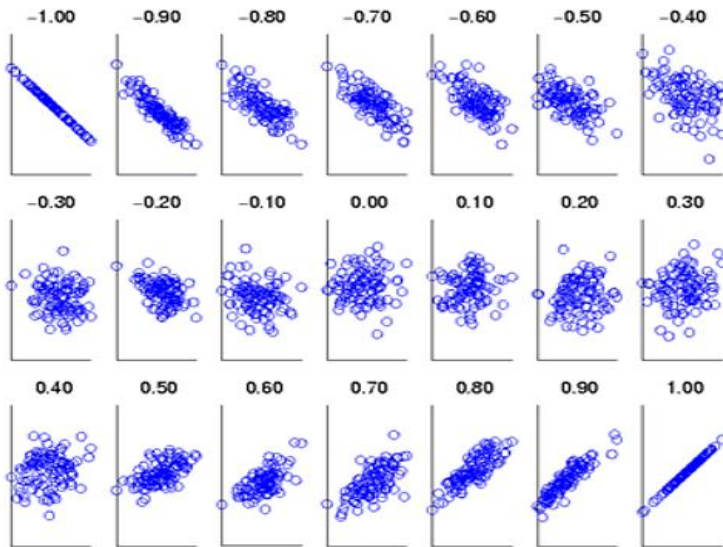
## 2.6 Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi adalah nilai yang menunjukkan kuat/tidaknya hubungan linier antar dua variabel yang mana pada penelitian ini adalah variabel suara. Koefisien korelasi biasa dilambangkan dengan huruf  $r$  dimana nilai  $r$  dapat bervariasi dari -1 sampai +1. Nilai  $r$  yang mendekati -1 atau +1 menunjukkan hubungan yang kuat antara dua variabel tersebut dan nilai  $r$  yang mendekati 0 mengindikasikan lemahnya hubungan antara dua variabel tersebut. Sedangkan tanda + (positif) dan - (negatif) memberikan informasi mengenai arah hubungan antara dua

variabel tersebut. Jika bernilai + (positif) maka kedua variabel tersebut memiliki hubungan yang searah. Dalam arti lain peningkatan X akan bersamaan dengan peningkatan Y dan begitu juga sebaliknya. Jika bernilai – (negatif) artinya korelasi antara kedua variabel tersebut bersifat berlawanan. Peningkatan nilai X akan dibarengi dengan penurunan Y. Koefisien korelasi dinyatakan menggunakan persamaan berikut:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x) (\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad 2.28$$

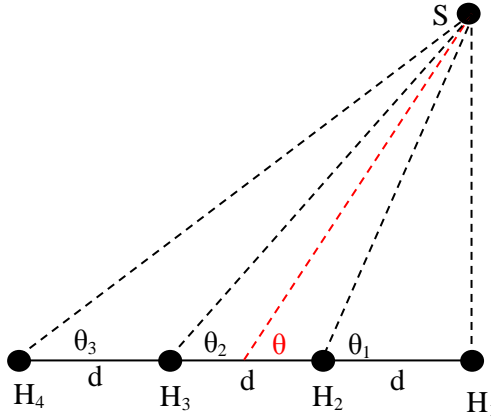
x dan y adalah sinyal yang diterima oleh hidrofons 1 dan 2. Syarat agar estimasi waktu tunda menjadi baik adalah jika 2 sinyal memiliki nilai korelasi yang mendekati 1 atau -1. Semakin rendah nilai koefisien korelasi menandakan bahwa 2 sinyal tidak identik, hal ini bisa jadi dipengaruhi oleh noise yang tertangkap oleh sensor (C. Lin, 2011). Ciri-ciri sinyal yang memiliki nilai korelasi rendah adalah distribusi sinyalnya mendekati distribusi Gaussian (semakin acak) seperti pada **Gambar 2.11** dibawah ini.



**Gambar 2.11** Ilustrasi koefisien korelasi berdasarkan distribusi sinyal (diakses dari [psychlopedia.wikispaces.com](http://psychlopedia.wikispaces.com))

## 2.7 Triangulasi

Triangulasi merupakan pengembangan dari metode trigonometri yang banyak digunakan. Prinsip dari metode ini adalah pengukuran sudut dan jarak untuk menentukan posisi dari suatu titik. Dengan menganggap bahwa berkas suara yang merambat pada medium berupa geometri sehingga berkas yang datang mengenai sensor merupakan garis lurus. Pada **Gambar 2.12** dapat dilihat bahwa terdapat 3 sudut yang terbaca oleh sensor dari propagasi gelombang suara yang dianggap sebagai garis lurus. Sudut-sudut tersebut didapat dari konversi waktu tunda antar hidrofon  $\tau_{ij}$  menggunakan **Persamaan 2.29, 2.30, dan 2.31**.  $i$  dan  $j$  menyatakan pasangan antar hidrofon, Sudut  $\theta_i$  didapatkan dari konversi waktu tunda antara  $H_1$  dan  $H_2$  begitupula untuk nilai sudut-sudut yang lain.



**Gambar 2.12** Triangulasi empat hidrofon untuk penentuan sudut sumber

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{R}{D} = \cos^{-1} \frac{c \cdot \tau_{12}}{d} \quad 2.29$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{R}{D} = \cos^{-1} \frac{c \cdot \tau_{23}}{d} \quad 2.30$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \frac{R}{D} = \cos^{-1} \frac{c \cdot \tau_{34}}{d} \quad 2.31$$

Konsep pembacaan sudut pada sensor *array* dengan merelatifkan seluruh sudut pembacaan ke titik tengah dari *array* (garis merah) seperti pada **Gambar 2.12**. Oleh karena itu diperlukan konversi sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  menjadi sudut  $\theta$  menggunakan persamaan berikut ini.

$$\tan \theta (d + 0,5d) = \tan \theta_{(1,3)} d \quad (2.32)$$

**Persamaan 2.32** berlaku hanya untuk mencari sudut  $\theta$  dari konversi sudut  $\theta_1$ , dan  $\theta_3$ . Untuk mencari sudut  $\theta$  berdasarkan  $\theta_2$  maka digunakan persamaan berikut.

$$\tan \theta \, 0,5d = \tan \theta_2 \, d \quad (2.33)$$

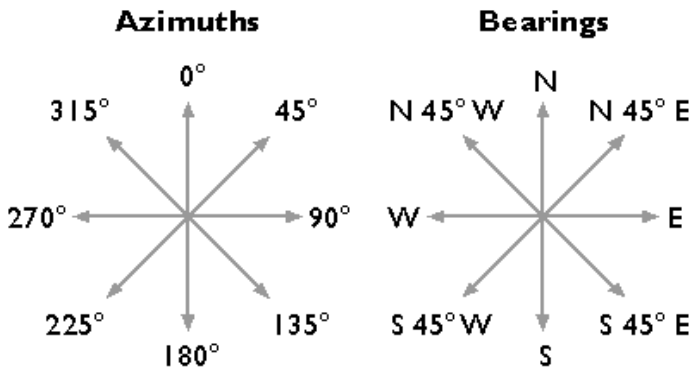
Kemudian hasil sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  yang telah dikonversi, dirata-ratakan untuk menemukan satu nilai sudutnya (Keun-Chang, 2013).

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \theta(n) \quad (2.34)$$

N adalah jumlah elemen hidrofon yang digunakan,  $\theta$  adalah nilai sudut utama dari hidrofon *array* yang ditangkap pada satu satuan waktu.

## 2.8 Bearing dan Azimut

Azimut adalah sudut putar dari arah barat hingga timur. Sebagai referensi sudut nol dipakai arah mata angin utara. Tanda (+) berarti arah putar searah jarum jam dari sudut nol, tanda (-) untuk arah sebaliknya. Sebagai contoh pada **Gambar 2.13**, dari sudut nol ke arah timur tepat adalah 90 derajat, dan barat adalah sudut -90 derajat. utara.



**Gambar 2.13** Azimut dan bearing

Bearing adalah nilai derajat arah yang direpresentasikan menjadi sudut. Sudutnya diukur dari utara maupun selatan, ke arah timur ataupun barat, setiap sudut tersebut menghasilkan derajat kurang dari 90 derajat. Kuadran yang dipakai ditunjukkan dengan huruf N (utara) atau S (selatan) mendahului sudutnya dan E (timur) atau W (Barat) mengikutinya seperti pada **Gambar 2.13**. Untuk mengkonversi sudut menjadi bearing digunakan persamaan pada **Tabel 2.2** dibawah ini:

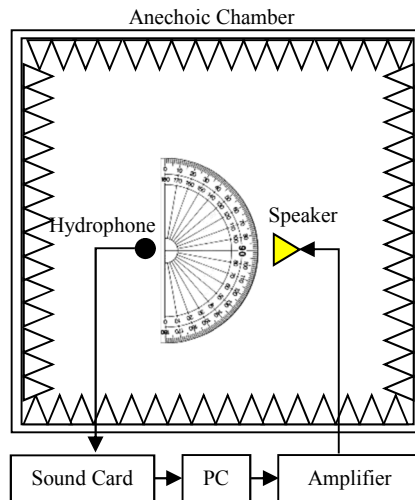
**Tabel 2.2** Konversi Azimut/sudut menjadi bearing

<b>Azimut/sudut (deg)</b>	<b>Bearing (deg)</b>
<b>0 – 90</b>	N (Azimut) E
<b>90 – 180</b>	S (180 – Azimut) E
<b>180 – 270</b>	S (Azimut – 180) W
<b>270 – 360</b>	N (360 – Azimut) W

### BAB III METODOLOGI

Pada bab ini akan dijabarkan metode yang disusun dan digunakan dalam penyelesaian permasalahan. Pada penelitian ini, sistem dirancang untuk mendeteksi sudut datang, kecepatan, dan arah sumber bunyi dalam air relatif terhadap sensor. Pendeteksian sumber suara dilakukan oleh sebuah sistem yang dibangun dengan metode pembentukan berkas (*beamforming*). Metode ini dibuat dengan tujuan membangun *beam pattern* dari susunan mikrofon *array* yang digunakan.

#### 3.1 Pengukuran Keterarahan Hidrofon



**Gambar 3.1** Skema pengukuran keterarahan *underwater speaker*

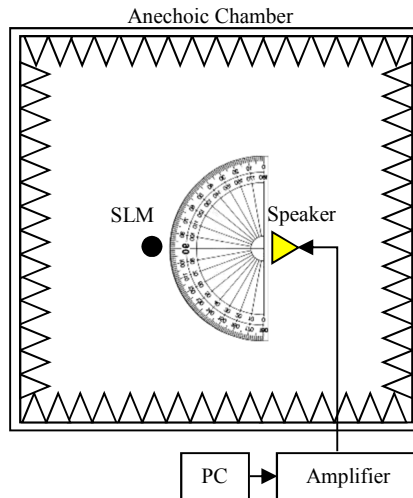
Pengukuran keterarahan hidrofon merujuk pada metode pencarian medan bebas di udara yang dilakukan untuk mengetahui pola radiasi dari hidrofon sehingga dapat diketahui sudut kepekaannya. Pengujian dilakukan di ruang kedap suara dengan



membangkitkan sinyal dengan frekuensi 1 kHz ke *underwater speaker* yang kemudian ditangkap oleh hidrofons. Pada pengambilan data kali ini yang bergerak dengan variasi jarak dan sudut adalah *underwater speaker*. Jarak antara *underwater speaker* dan hidrofons divariasikan sebesar 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, dan 60 cm dengan rentang sudut datang dari 0 sampai 180 derajat.

### 3.2 Pengukuran Keterarahan *Underwater Speaker*

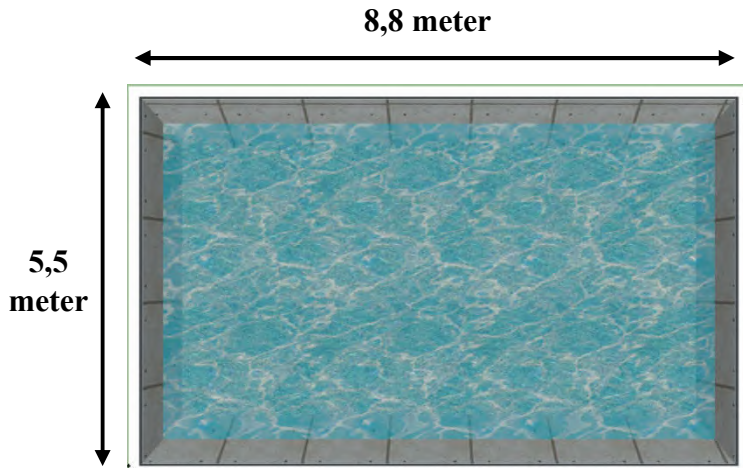
Pengukuran keterarahan dilakukan untuk mengetahui medan bebas *underwater speaker* sehingga dapat diketahui berapa jarak minimal antara *underwater speaker* dan hidrofons. Pengujian dilaksanakan di ruang kedap suara dengan membangkitkan sinyal dari *software* berfrekuensi 1000 Hz ke *underwater speaker* yang kemudian diukur intensitasnya menggunakan *sound level meter*. Jarak antara *underwater speaker* dan *sound level meter* divariasikan sebesar 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, dan 60 cm dengan rentang sudut pengukuran dari 0 sampai 180 derajat.



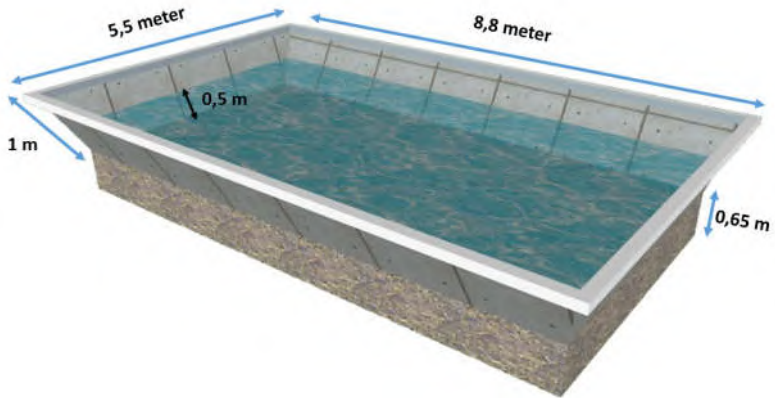
**Gambar 3.2** Skema pengukuran keterarahan hidrofons

### 3.3 Pengukuran Kecepatan Suara Bawah Air

Pengerjaan penelitian ini dilakukan dalam lingkungan kampus ITS dengan peralatan seperti *speaker*, soundcard, hidrofons, dan laptop. Digunakan kolam di jurusan Teknik Fisika sebagai tempat pengambilan data dengan dimensi kedalaman sebesar 1.5 meter, panjang 8.8 m, lebar 5.5 m. Kolam ini memiliki dinding yang terbuat dari beton semen yang terpasang pada sisi-sisi kolam. Dasar kolam berupa lapisan sedimen tanah yang diharapkan dapat mengurangi pantulan bunyi sehingga waktu dengung kolam menjadi lebih kecil. Nilai waktu dengung yang kecil akan meningkatkan tingkat deteksi sinyal sumber yang datang ke sensor karena jumlah lintasan bunyi yang datang lebih kecil. Pengambilan data ini dilakukan pada keadaan kolam terisi air dengan ketinggian 0.5 meter terhitung dari dasar kolam.



**Gambar 3.3** Kolam tampak atas



**Gambar 3.4** Kolam tampak 3D

Pengambilan data cepat rambat bunyi dilakukan dengan membangkitkan sinyal impuls dengan menggunakan skema pengambilan data seperti pada **Gambar 3.5**. Untuk mengetahui selisih waktu penerimaan sinyal yang dibangkitkan, maka digunakan dua buah hidrofon dan satu *speaker* dengan konfigurasi berikut. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah :

$$v = \frac{s}{t} \quad (3.1)$$

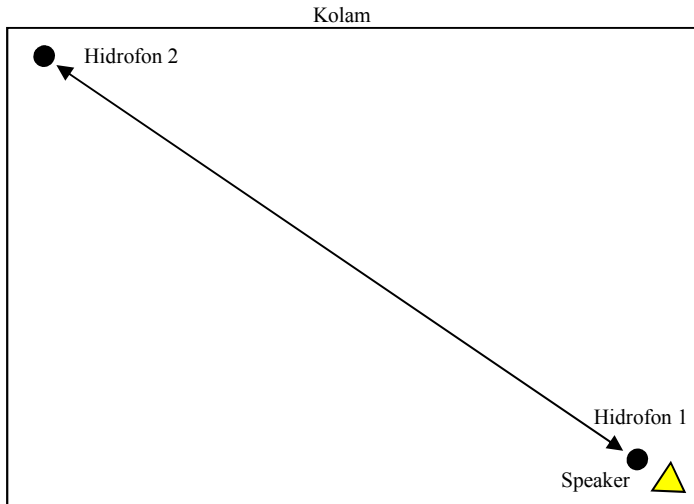
Dimana :

$v$  = kecepatan (m/s)

$s$  = jarak antar hidrofon (s)

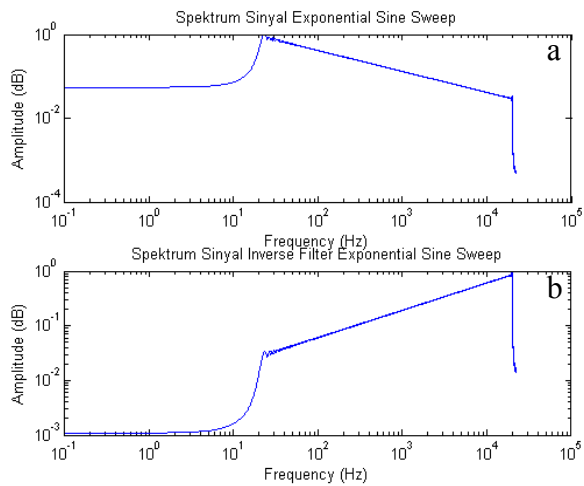
$t$  = beda waktu penerimaan sinyal antar hidrofon (s)

Untuk mendapatkan beda waktu penerimaan sinyal maka digunakan 2 buah hidrofon yang dipisahkan dengan jarak sebesar 9.4 meter dengan jarak antara hidrofon 2 dan *speaker* sebesar 10 cm, semuanya diletakkan pada kedalaman 25 cm dari permukaan air kolam. Hasil data kecepatan suara dalam air kolam nantinya akan digunakan sebagai data acuan dalam estimasi sudut datang sumber bunyi bawah air.



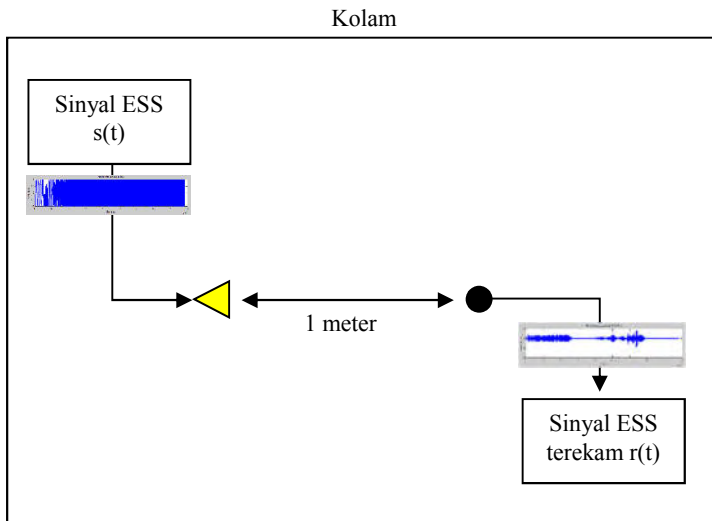
**Gambar 3.5** Skema pengambilan data cepat rambat bunyi empirik tampak atas

### 3.4 Pengukuran *Impulse response*



**Gambar 3.6** (a) Spektrum sinyal ESS  $s(t)$  dan (b) *inverse filter*  $f(t)$

Pengambilan data *impulse response* dilakukan untuk mendapatkan fungsi transfer keseluruhan bagaimana suara berperilaku dalam kolam. Hasil pengukuran *impulse response* digunakan untuk mensimulasikan kondisi suatu suara jika dibangkitkan dalam kolam dengan cara kovolusi *impulse response* dengan sinyal yang akan dibangkitkan. Sebelum dilakukan pengukuran, terlebih dahulu disiapkan sinyal yang ESS dan inverse filter-nya dengan range frekuensi antara 20-20 kHz yang dibuat dari **Persamaan 2.12**. Sinyal tersebut dibuat menggunakan software Matlab. Setelah sinyal ESS dan inverse filter-nya dibuat maka dilanjutkan dengan pengambilan data *impulse response* kolam.



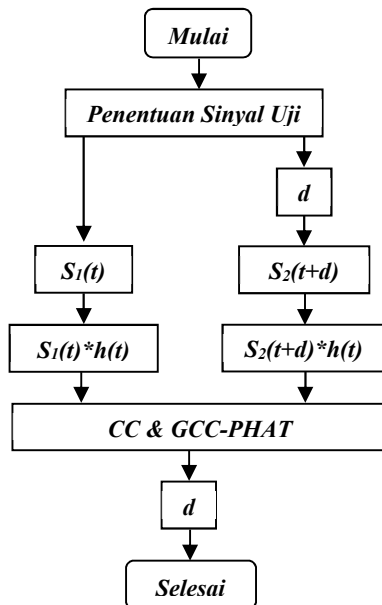
**Gambar 3.7** Skema Pengambilan Data *Impulse response* Tampak Atas

Langkah pertama adalah mengkonfigurasi hidrofons dan *speaker* seperti **Gambar 3.7**. *Speaker* dan hidrofons terpisah pada jarak 1 meter dengan kedalaman 0.25 cm dari permukaan air.

Kemudian pada waktu yang bersamaan dibangkitkan dan direkam sinyal ESS dengan durasi 10 detik. Setelah suara rekaman sinyal ESS didapatkan, dilanjutkan dengan pengolahan data agar *impulse response* dapat diekstraksi. Ekstraksi dilakukan dengan cara mengkonvolusikan sinyal hasil rekaman  $r(t)$  dengan sinyal *inverse* filter  $f(t)$  menggunakan software Matlab seperti pada **Persamaan 2.14**.

### 3.5 Simulasi Estimasi Waktu Tunda

Pada penelitian ini dilakukan simulasi estimasi waktu tunda dari dua sinyal yang dibangkitkan dibawah air dengan variasi derau menggunakan software Matlab. Sebelum diestimasi, salah satu sinyal diberikan waktu tunda untuk mensimulasikan kondisi suatu hidrofon yang terdistribusi secara spasial.



**Gambar 3.8** Diagram alir simulasi estimasi waktu tunda

Simulasi kondisi suara bawah air juga dilakukan, dengan cara mengkonvolusikan kedua sinyal uji dengan *impulse response* yang didapatkan dari kolam. Selain itu, faktor yang mempengaruhi akurasi pembacaan waktu tunda juga disimulasikan yakni dengan cara menambahkan derau dengan berbagai tingkatan (SNR) pada sinyal uji. Sinyal yang sudah disimulasi kemudian diestimasi menggunakan algoritma cross correlation dan generalized cross correlation phase transform (GCC-PHAT) agar diperoleh waktu tundanya. Sinyal uji yang digunakan adalah sinyal wicara.

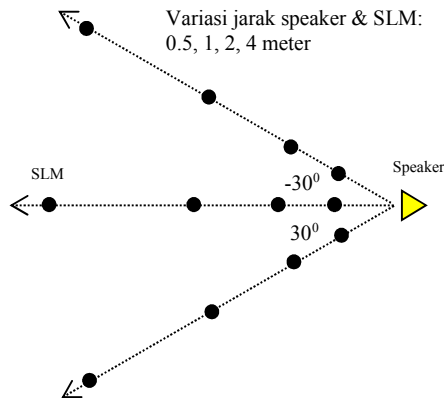
### 3.6 Pelacakan Posisi Sumber Suara di Udara

Metode pelacakan posisi sumber suara diudara digunakan sebagai acuan sebelum melakukan pengambilan data di air karena karakteristik perambatan akustik medium udara, hampir sama dengan medium air. Terdapat dua tahap sebelum melakukan pengambilan data yakni, pencarian medan bebas dan pelacakan sumber bunyi di udara itu sendiri.

#### 3.6.1 Pencarian Medan Bebas

Suara yang merambat diudara memiliki karakteristik yang berbeda-beda seperti penyerapan, pematulan, dan transmisi. Karakteristik tersebut dapat menyebabkan pengukuran suatu sinyal akustik menjadi terganggu. Akibat dari adanya gangguan ini, maka pengukuran akustik dibedakan menjadi pengukuran akustik pada medan dekat, bebas, dan jauh. Medan bebas yaitu medan suara yang tidak dipengaruhi oleh faktor pengganggu gelombang sehingga pada daerah ini berlaku pengurangan tingkat tekanan bunyi sebesar 6 dB setiap dua kali pertambahan jarak. Sebelum melakukan pengambilan data, terlebih dahulu dicari jarak medan bebas dan tingkat tekanan bunyi yang harus dihasilkan oleh *speaker*. Terdapat 2 macam variasi pada tahap ini, yang pertama adalah variasi jarak 0.5, 1, 2, 4 meter. Tahap kedua adalah variasi sudut 0, 30, -30 derajat relatif terhadap *speaker*. Medan bebas diperoleh jika syarat perubahan dua kali jarak berkurang 6 dB terjadi pada setiap sudut dengan frekuensi yang dibangkitkan

sebesar 1 kHz. Pengukuran tingkat tekanan bunyi menggunakan Sound Level Meter Dekko SL-10.



**Gambar 3.9** Pencarian medan bebas di udara (tampak atas)

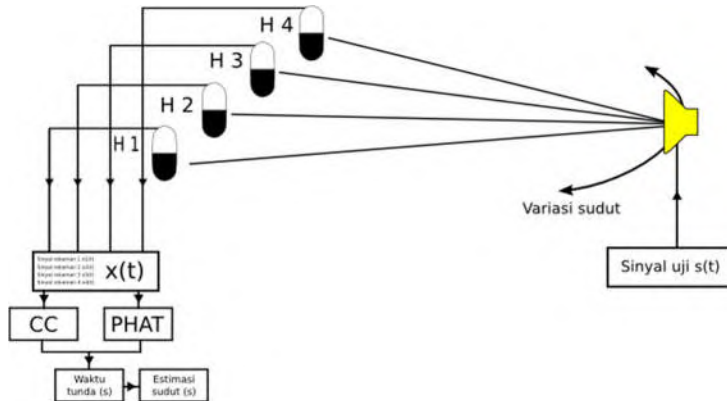
### 3.6.2 Pelacakan Posisi Sumber Suara

Setelah didapatkan jarak minimal dan besar tingkat tekanan bunyi yang harus dibangkitkan, kemudian dilakukan pengambilan data dengan skenario pada **Gambar 3.10**. Digunakan kombinasi 4 hidrofon sebagai pelacak dan 1 *speaker* sebagai target. Pengambilan data dilakukan di dalam ruangan dan luar ruangan untuk mengetahui efek pembacaan sudut oleh sensor. Kemudian target dipindahkan dengan variasi sudut 0, 30, 45, 60, 90 derajat relatif terhadap sensor untuk pengukuran dalam ruangan dan variasi sudut 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 derajat untuk pengukuran diluar ruangan. Terdapat perbedaan variasi sudut yang digunakan karena terbatasnya tempat pengukuran didalam ruangan sehingga hanya diambil beberapa sudut saja.

Hal yang perlu diperhatikan ketika pengambilan data dengan sensor *array* adalah fenomena *spatial aliasing* seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.3**. Untuk menghindari hal tersebut



jarak pisah antar sensor harus lebih dari frekuensi maksimum dari sinyal yang dibangkitkan. Pada uji yang dilakukan, sinyal uji terbesar dengan frekuensi *puretone* sebesar 1 kHz. Digunakan tipe *linear array* pada penelitian ini, dikarenakan pelacakan hanya pada sudut 0 – 180 derajat sehingga didapatkan sensitifitas penangkapan yang lebih luas.



**Gambar 3.10** Diagram alir proses perekaman dan pengolahan estimasi sudut sumber bunyi di udara (tampak samping)

Dengan merujuk cepat rambat suara diudara sebesar 344 m/s didapatkan jarak pisah sensor sebesar 17 cm. Pada proses perekaman, digunakan frekuensi sampling sebesar 44.1 kHz, yang merupakan frekuensi sampling standar pada sinyal suara *audible* (20-20 KHz). Secara singkat prosedur dalam melakukan pengambilan data sudut sumber suara dapat dijelaskan oleh diagram alir pada **Gambar 3.10**. Jika dibandingkan dengan proses simulasi, waktu tunda diperoleh akibat sensor yang terdistribusi secara spasial.

### 3.7 Pelacakan Posisi Sumber Suara di Air

Metode pelacakan posisi sumber suara di air mengacu kepada metode pelacakan posisi sumber suara di udara. Tempat yang

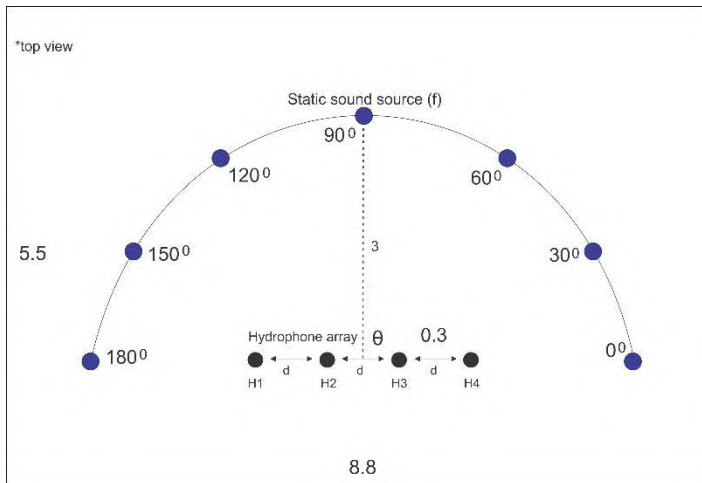
digunakan untuk pengambilan data adalah di kolam Jurusan Teknik Fisika. Terdapat dua tahap sebelum melakukan pengambilan data yakni, pencarian medan bebas dan pelacakan sumber bunyi di udara itu sendiri.

### 3.7.1 Pencarian Medan Bebas

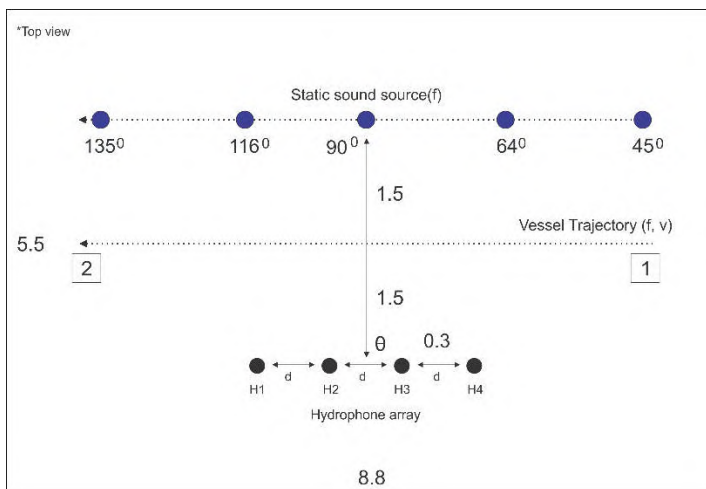
Metode pencarian medan bebas di dalam kolam sama dengan metode pengambilan data di udara. Hanya saja tidak ada variasi sudut pada saat dikarenakan lebar kolam yang terlalu kecil. Posisi hidrofons segaris dengan *underwater speaker* dan diletakkan di tengah kolam.

### 3.7.2 Pelacakan Posisi Sumber Suara

Setelah didapatkan jarak minimal dan besar tingkat tekanan bunyi yang harus dibangkitkan, kemudian dilakukan pengambilan data dengan skenario pada **Gambar 3.11 dan 3.12**. Digunakan kombinasi 4 hidrofons sebagai pelacak, 1 *speaker* dan 1 kapal *remote control* sebagai target. Terdapat tiga jenis variasi pengambilan data yakni pertama, sumber bunyi dibangkitkan secara diskrit (variasi sudut 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 derajat) lintasan setengah bola. Kedua, sumber bunyi dibangkitkan secara diskrit (variasi sudut 45, 64, 90, 135, 154 derajat) lintasan lurus. Ketiga, ketika sumber bunyi bergerak berupa kapal dengan *propeller* yang berputar. Terdapat 2 macam variasi arah gerak, yakni pergerakan dari titik 1 menuju 2 dan gerak dari titik 2 menuju 1. Dengan merujuk cepat rambat suara diudara sebesar 1492.1 m/s didapatkan jarak pisah sensor sebesar 30 cm. Kapal selam yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi 35 x 10 x 9 cm dengan berat 1.6 kg. Pada saat dioperasikan, propeller kapal selam berada pada jarak 10 cm dari permukaan air.



**Gambar 3.11** Skenario pelacakan posisi sumber suara diskrit dengan lintasan setengah lingkaran



**Gambar 3.12** Skenario pelacakan posisi sumber suara diskrit dan bergerak dengan lintasan lurus



**Gambar 3.13** Kapal selam *remote control* yang digunakan sebagai objek deteksi yang bergerak

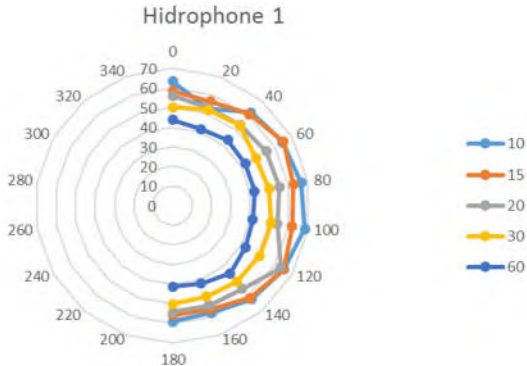
### 3.8 Pengolahan Data Menggunakan CC dan GCC-PHAT

Hasil rekaman yang diterima oleh keempat buah hidrofon kemudian diolah menggunakan algoritma CC dan PHAT untuk diestimasi waktu tundanya seperti pada **Gambar 3.9** dan **3.10**. Setelah waktu tundanya diketahui, kemudian dikonversi menjadi nilai sudut menggunakan metode triangulasi sehingga dapat diperoleh nilai sudut sumber suara relatif terhadap titik tengah hidrofon *array*.

*Halaman ini memang dikosongkan.*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengukuran Pola Keterarahan Hidrofon



**Gambar 4.1** Pola keterarahan hidrofon 1

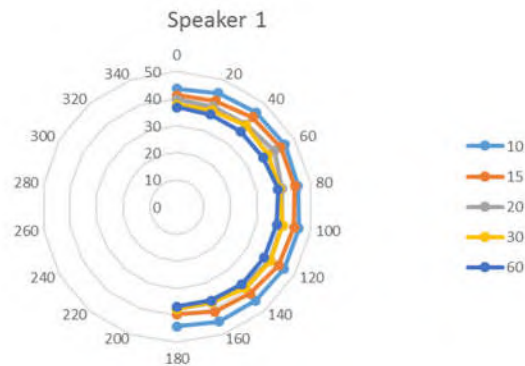
Langkah awal yang dilakukan sebelum melakukan pengambilan data menggunakan hidrofon dan penguas suara bawah air adalah pengukuran pola keterarahannya. Pola keterarahan ini akan menentukan arah setiap peralatan dalam konfigurasi yang akan dibangun dalam suatu sistem. Pengukuran pola keterarahan radiasi dilakukan dengan merekam *puretone* frekuensi 1000 Hz. Sinyal ini dibangkitkan oleh penguas suara bawah air yang dipasang pada variasi sudut tertentu.

Hasil pengukuran hidrofon pada **Gambar 4.1** menunjukkan bahwa nilai kepekaan pembacaan tingkat tekanan bunyi pada semua sudut datang cenderung rata dan tidak mengalami peningkatan yang terlalu signifikan, seperti pada **Tabel 4.1** disetiap perubahan jarak menunjukkan bahwa keempat hidrofon yang digunakan hampir menyebar rata pada sisi depannya. Hal ini dapat dilihat dari nilai standar deviasi pengukuran variasi sudut yang relatif kecil pada setiap variasi jaraknya. Dari hasil pengukuran diatas, diperoleh medan bebas terjadi pada jarak 30 cm dikarenakan

pada jarak ini pertambahan 2 kali jarak menyebabkan penurunan 6 dB.

**Tabel 4.1** Standar deviasi pengukuran tingkat tekanan bunyi pada hidrofon

Hidrofon	Standar deviasi TTB hidrofon (dB)				
	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	60 cm
Hidrofon 1	4.56	3.50	2.96	1.30	1.25
Hidrofon 2	4.85	2.72	2.60	2.63	1.75
Hidrofon 3	6.43	5.86	0.93	2.28	0.98
Hidrofon 4	6.03	7.44	3.62	2.37	1.10



**Gambar 4.2** Pola keterarahan underwater *speaker*

**4.2 Hasil Pengukuran Keterarahan Underwater Speaker**

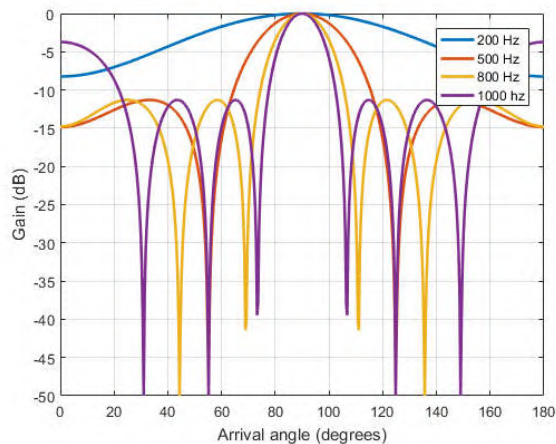
Hasil pengukuran keterarahan *speaker* pada **Gambar 4.2** menunjukkan bahwa nilai keterarahan tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan pada semua sudut datang cenderung sama dan tidak mengalami peningkatan yang terlalu signifikan, seperti pada **Tabel 4.2** hal ini dapat dilihat dari nilai standar deviasi pengukuran variasi sudut yang relatif kecil pada setiap variasi jaraknya. Deviasi maksimum terjadi pada jarak 15 cm dengan nilai sebesar 1.53 dB.

Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa bahwa *speaker* yang digunakan hampir menyebar rata pada sisi depannya.

**Tabel 4.2** Standar deviasi pengukuran tingkat tekanan bunyi pada *underwater speaker*

<i>Speaker</i>	Standar deviasi TTB <i>speaker</i> (dB)				
	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	60 cm
<b><i>Speaker 1</i></b>	0.71	1.53	1.12	0.84	0.45

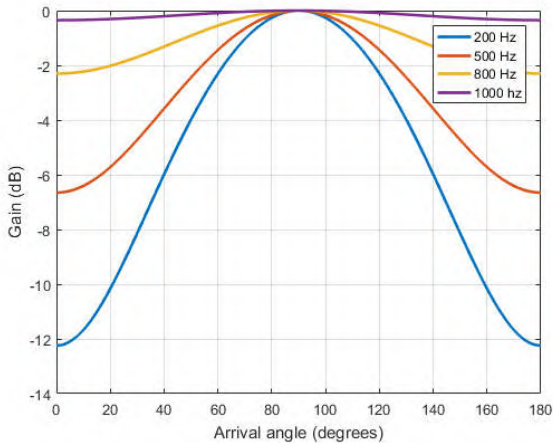
### 4.3 Simulasi Pola Keterarahan Hydrophone Array



**Gambar 4.3** Pola sensitifitas linear *array* dengan empat hidrofon di udara

Untuk menggambarkan keterarahan penangkapan sinyal suara oleh mikrofon *array* digunakan polar plot. Pada penelitian ini digunakan hidrofon *array* tipe linear dengan jumlah hidrofon sebanyak 4 buah dengan jarak antar hidrofonnya sebesar 30 cm. Frekuensi yang digunakan untuk uji sensitifitas sebesar 200, 500, 800, dan 1000 Hz dengan kecepatan suara di air sebesar 1492.1 m/s dan di udara sebesar 343 m/s. Dari hasil pengukuran keterarahan hidrofon, didapatkan kesimpulan bahwa hidrofon bersifat *omnidirectional*.

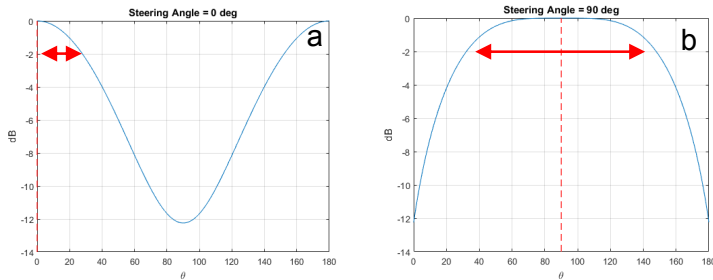




**Gambar 4.4** Pola sensitifitas linear *array* dengan empat hidrofon di air

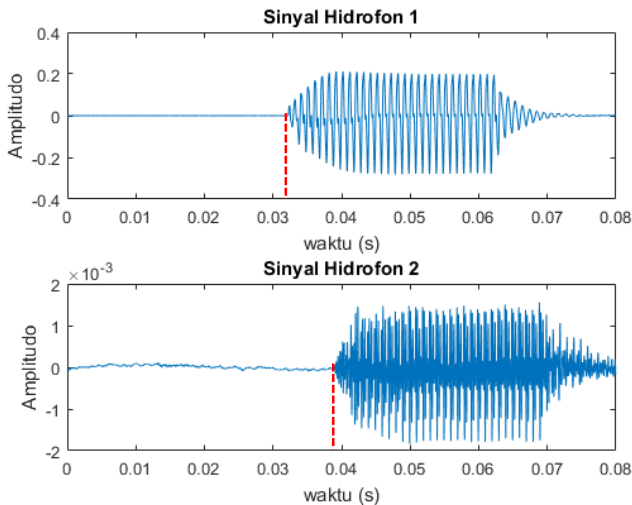
Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa posisi sudut terhadap *gain* yang semakin mendekati 0 dB merupakan sudut paling sensitif karena *gain* terbesar pada posisi hidrofon *array*  $90^0$  terhadap sumber. *Gain* terbesar pada posisi sudut  $90^0$  karena waktu penerimaan suara pada masing-masing hidrofon pada waktu yang sama (*hampir tanpa delay*) sedangkan apabila terdapat penambahan sudut antara mikrofon *array* dengan sumber, memberikan efek *delay* pada sinyal yang diterima masing-masing mikrofon yang menyebabkan perbedaan waktu dan fasa sinyal (McCowan, 2001). Jika **Gambar 4.3** dan **4.4** dibandingkan, dapat diketahui bahwa sensitifitas hidrofon dalam air lebih tinggi daripada sensitifitas hidrofon di udara. Jika kita lihat **Persamaan 2.5** tentang sensitifitas keluaran pada hidrofon *array*, semakin tinggi frekuensi dan kecepatan suara merambat maka *gain* tangkapan hidrofon semakin besar juga. Kemudian dilakukan simulasi apabila suatu hidrofon *array* diarahkan pada sudut 0, 30, 60, 90, 120, 150, dan 180 derajat. Dari hasil simulasi didapatkan hasil bahwa, tangkapan yang diarahkan pada sudut 90 derajat mempunyai daerah tangkapan yang paling besar seperti pada

**Gambar 4.5 (b).** Sementara sudut yang mengarah pada sudut 0 derajat mempunyai daerah tangkapan yang paling kecil. Hasil ini berbanding lurus sesuai **Persamaan 2.7**, ketika nilai sudut semakin mendekati 0 maka daerah tangkapan semakin kecil sehingga lebih mudah terinterferensi noise yang ada disekitar sudut tangkapan.



**Gambar 4.5** Sinyal keluaran  $M=4$  hidrofons *array* dalam air ketika (a) mengarah pada sudut 0 derajat (b) mengarah pada sudut 90 derajat

#### 4.4 Hasil Pengukuran Kecepatan Suara Bawah Air



**Gambar 4.6** Waktu tunda antara hidrofons 1 dan hidrofons 2

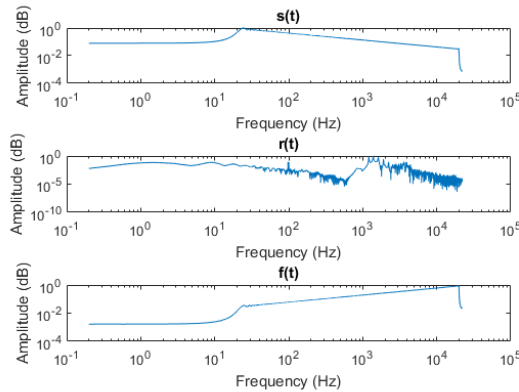
Tidak digunakan persamaan kecepatan suara bawah air untuk menghitung kecepatan air dalam kolam, karena kondisi air disetiap lingkungan berbeda-beda sehingga perlu dilakukan pengukuran secara empirik. Percobaan ini dilakukan seperti prosedur yang dilakukan oleh (Yuwono, 2012) pada akuarium *semi-anechoic*. Pengukuran dilakukan seperti skema pada **Gambar 3.5** dimana sumber yang dibangkitkan memiliki variasi durasi sebesar 0.03 detik dan 0.5 detik. Dari data yang diperoleh, kemudian dihitung perbedaan waktu tunda antara hidrofon 1 dan hidrofon 2 seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.6** Jarak antara hidrofon 1 dan hidrofon 2 sebesar 9.4 meter. Dari hasil waktu tunda yang telah didapat, kemudian dihitung menggunakan **Persamaan 3.1**. Sehingga diperoleh hasil kecepatan suara bawah air seperti pada **Tabel 4.3**. Berdasarkan hasil perhitungan pada **Tabel 4.3**, cepat rambat bunyi dalam kolam bernilai sebesar 1492.063 m/s. Kemudian, hasil eksperimen divalidasi menggunakan persamaan kecepatan oleh Leroy, Edwin, dan Mackenzie dengan parameter masukan berupa suhu air kolam sebesar 24.6 °C, salinitas sebesar 0 (air tawar), dan kedalaman sebesar 0.25 meter.

**Tabel 4.3** Nilai cepat rambat bunyi empirik

Durasi (s)	Waktu Delay (s)	Kecepatan (m/s)
0,03	0,0063	1492,063
0,3	0,0063	1492,063
0,5	0,0063	1492,063

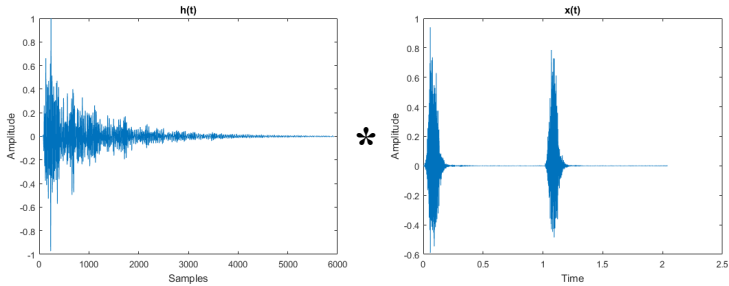
Menggunakan persamaan-persamaan tersebut diperoleh kecepatan suara bawah air berturut-turut sebesar 1493.9, 1495.1, dan 1495.2 m/s dengan *error* antara hasil pengukuran dan perhitungan menggunakan persamaan tersebut berturut-turut sebesar 1.83, 3.03, dan 3.14 m/s. *Error* yang didapatkan cukup kecil sehingga hasil pengukuran kecepatan empirik dapat digunakan untuk estimasi sudut sumber bunyi. Data kecepatan yang telah didapatkan kemudian digunakan sebagai acuan untuk estimasi sudut posisi sumber bunyi bawah air.

#### 4.5 Hasil Pengukuran *Impulse Response*



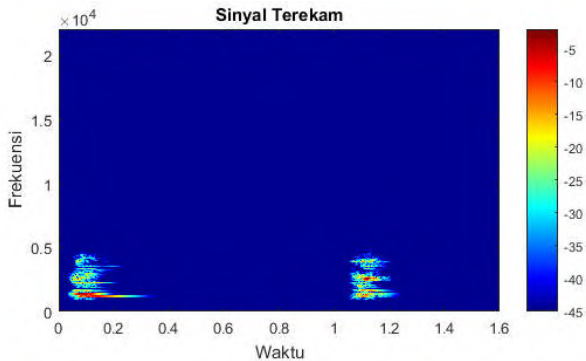
**Gambar 4.7** Sinyal ESS  $s(t)$ , sinyal rekaman ESS  $r(t)$ , dan invers filter ESS  $f(t)$

Pengukuran *impulse response* mengacu kepada metode yang dikembangkan oleh (Farina, 2000). Pada penelitian ini, *impulse response* digunakan untuk mensimulasikan kondisi kolam untuk mengetahui performa waktu tunda. Pengukuran dilakukan seperti skema pada **Gambar 3.7** dan diperoleh hasil sinyal rekaman ESS seperti pada **Gambar 4.7**. Proses ekstraksi dilakukan dengan cara mengkonvolusikan sinyal rekaman ESS  $r(t)$  dengan sinyal invers filternya  $f(t)$  seperti pada **Persamaan 2.14** sehingga didapatkan *impulse response*  $h(t)$ . Setelah dilakukan ekstraksi menggunakan proses dekonvolusi maka diperoleh hasil suatu sinyal *impulse response*  $h(t)$  pada kolam seperti pada **Gambar 4.8**.

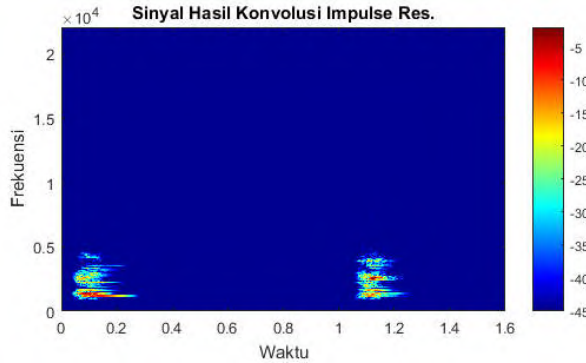


**Gambar 4.8** Konvolusi sinyal hasil pengukuran *impulse response*  $h(t)$  dengan sinyal wicara  $x(t)$

Untuk menguji apakah sinyal *impulse* telah mewakili kondisi kolam, maka dilakukan evaluasi. Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan suatu sinyal wicara yang dibangkitkan pada kolam dan sinyal wicara hasil  $x(t)$  konvolusi dengan *impulse response*  $h(t)$ . Hasil proses konvolusi diatas diperoleh hasil sinyal simulasi seperti **Gambar 4.8**. Dari **Gambar 4.9** dan **4.10** dapat dilihat bahwa spektrum dan pola sinyal simulasi hasil konvolusi cukup identik dengan sinyal terekam.

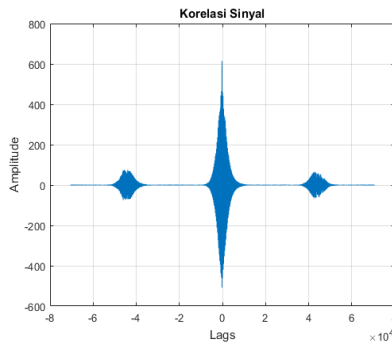


**Gambar 4.9** Spektrogram sinyal terekam

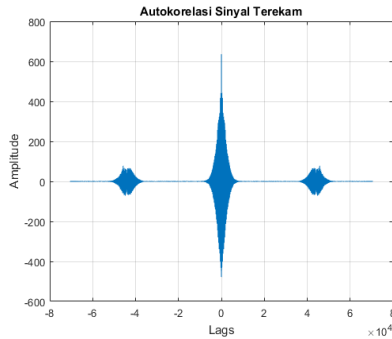


**Gambar 4.10** Spektrogram sinyal hasil konvolusi

Evaluasi dilakukan dengan metode korelasi silang pada kedua sinyal tersebut, suatu sinyal dianggap identik apabila sinyal hasil korelasi simetris dan nilai koefisien korelasinya mendekati 1. Dari hasil pengujian pada **Gambar 4.11** dapat dilihat bahwa sinyal hasil korelasi hampir mendekati simetris seperti hasil autokorelasi sinyal terekam dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0.6186. Selain itu, dilakukan juga evaluasi menggunakan *mean square error* (MSE). Evaluasi berdasarkan nilai MSE menunjukkan hasil yang cukup baik dimana nilai MSE sinyal terekam dan sinyal hasil konvolusi bernilai sebesar 0.0203. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal *impulse response* dianggap dapat mewakili kondisi kolam.



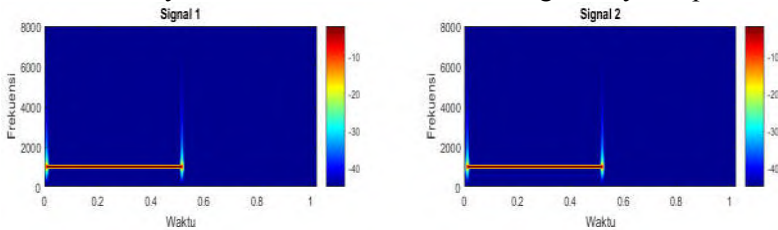
**Gambar 4.11** Hasil korelasi sinyal terekam dan sinyal hasil konvolusi.



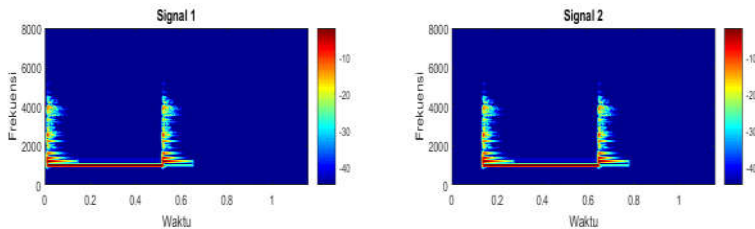
**Gambar 4.12** Hasil autokorelasi sinyal terekam

#### 4.6 Hasil Simulasi Estimasi Waktu Tunda

Setelah *impulse response* telah didapatkan, kemudian dilakukan simulasi pembacaan waktu tunda. Simulasi dilakukan dengan cara membuat 2 sinyal uji (*tone 1000 Hz*) yang salah satunya telah diberikan waktu tunda seperti pada **Gambar 4.14**. Kemudian sinyal tersebut dikonvolusikan dengan sinyal *impulse*



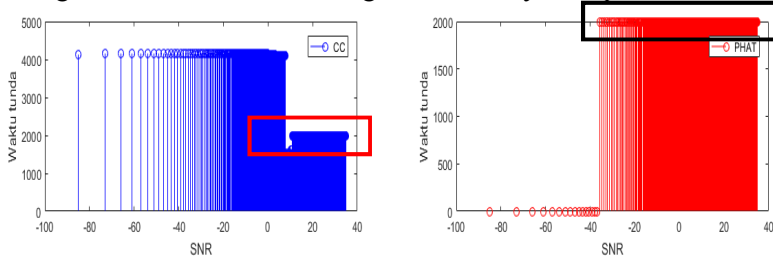
**Gambar 4.13** Sinyal uji sebelum dikonvolusi



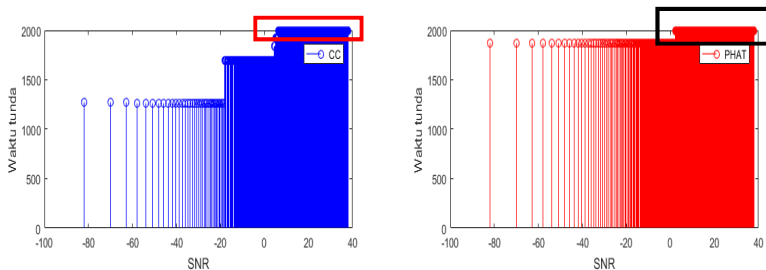
**Gambar 4.14** Sinyal uji yang diberi waktu tunda setelah dikonvolusi dengan *impulse response*

response sehingga sinyal uji seolah-olah dibangkitkan dalam kolom seperti pada **Gambar 4.14**. Pada proses simulasi, ditambahkan variasi *noise* untuk menggambarkan kondisi lingkungan sebenarnya. Sinyal *noise* yang digunakan antara lain: *whitenoise*, *pinknoise*, dan *brownnoise*. Besarnya SNR yang digunakan antara 100 sampel hingga 20 dB pada setiap sinyal uji.

Waktu tunda yang diberikan pada simulasi sebesar 2000 sampel, kemudian dihitung menggunakan metode CC dan PHAT. Hasil estimasi ditunjukkan pada **Gambar 4.15**, **4.16**, dan **4.17**. Sumbu-x menunjukkan besarnya SNR dan sumbu-y menunjukkan waktu tunda yang terestimasi. Pada pengujian pertama ditambahkan *brownnoise* pada sinyal uji, hasil plot pada **Gambar 4.15** menunjukkan bahwa estimasi PHAT dapat mengestimasi waktu tunda dengan benar sampai SNR -38 dB dan CC dapat mengestimasi waktu tunda dengan benar hanya sampai SNR 15 dB.

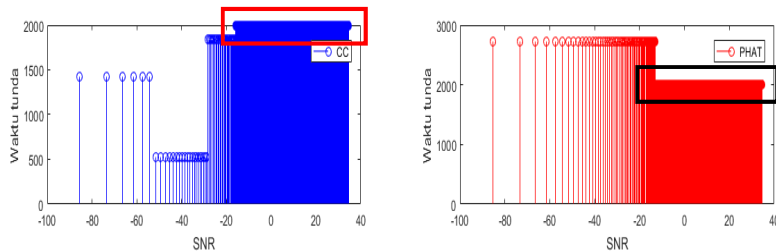


**Gambar 4.15** Pengaruh SNR terhadap estimasi waktu tunda (*brownnoise*)



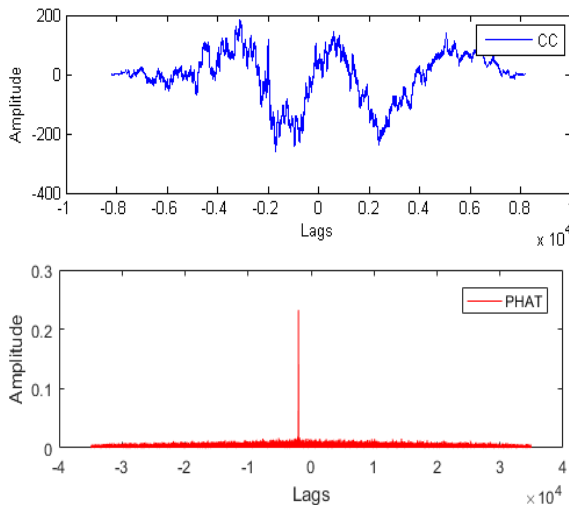
**Gambar 4.16** Pengaruh SNR terhadap estimasi waktu tunda (*pinknoise*)





**Gambar 4.17** Pengaruh SNR terhadap estimasi waktu tunda (*whitenoise*)

Pada pengujian yang kedua ditambahkan *pinknoise* sebagai sinyal pengganggu, hasil plot pada **Gambar 4.16** menunjukkan bahwa estimasi PHAT dapat mengestimasi waktu tunda dengan benar sampai SNR 5 dB dan CC dapat mengestimasi waktu tunda dengan benar hanya sampai SNR 10 dB. Pada pengujian yang ketiga ditambahkan *whitenoise* dengan distribusi gaussian sebagai sinyal pengganggu, hasil plot pada **Gambar 4.17** menunjukkan bahwa estimasi PHAT dan CC dapat mengestimasi waktu tunda sampai SNR -18 dB saja.



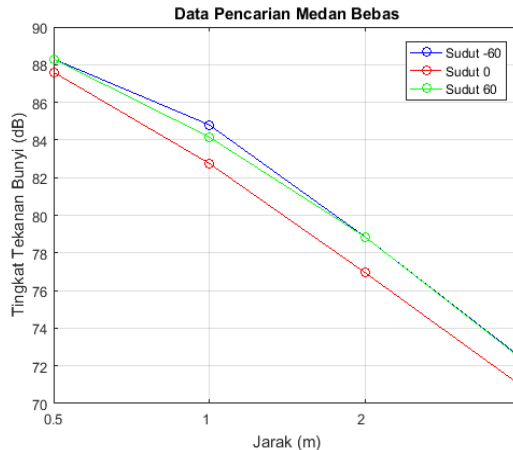
**Gambar 4.18** Pembacaan puncak menggunakan CC dan PHAT

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, kedua metode dapat digunakan untuk mengestimasi waktu tunda hingga SNR bernilai negatif. Tetapi pembacaan oleh PHAT secara umum lebih baik daripada metode CC hal ini dapat dilihat dari hasil uji yang telah dilakukan. PHAT mempunyai tingkat perhitungan yang baik karena mampu mempertajam pembacaan puncak suatu sinyal sehingga tidak menghasilkan puncak-puncak yang lain seperti pada **Gambar 4.18** yang mengakibatkan meningkatkan estimasi waktu tunda dengan benar. Karena pada proses PHAT terjadi *prefiltering* sinyal sehingga meningkatkan dan menajamkan pembacaan puncak sehingga didapatkan hasil pembacaan waktu tunda yang lebih baik. Secara umum, meningkatnya SNR menurunkan pembacaan waktu tunda suatu sinyal dengan benar hal ini terjadi karena terjadi korelasi antara sinyal *noise* sehingga menghasilkan waktu tunda yang lain.

## **4.7 Hasil Pelacakan Posisi Sumber Suara di Udara**

### **4.7.1 Pencarian Medan Bebas**

Pengukuran medan bebas dilakukan sesuai dengan skema pada **Gambar 3.9** dimana terdapat 3 variasi sudut dan 4 variasi jarak pada setiap sudutnya. Dari hasil pencarian medan bebas di udara didapatkan hasil seperti pada **Gambar 4.19**. Syarat terjadi medan bebas adalah ketika 2 kali pertambahan jarak maka tingkat tekanan bunyi berkurang sebesar 6 dB. Pada pengukuran ini, pengurangan menjadi 6 dB terjadi pada saat jarak *speaker* dan sensor berubah dari 1 meter menjadi 2 meter. Pada jarak tersebut pengurangan pada variasi sudut -30, 0, 30 derajat berturut-turut sebesar 5.95, 5.8, 5.3 dB. Pengurangan menjadi 6 dB juga terjadi pada saat jarak *speaker* dan sensor berubah dari 2 meter menjadi 4 meter. Pada



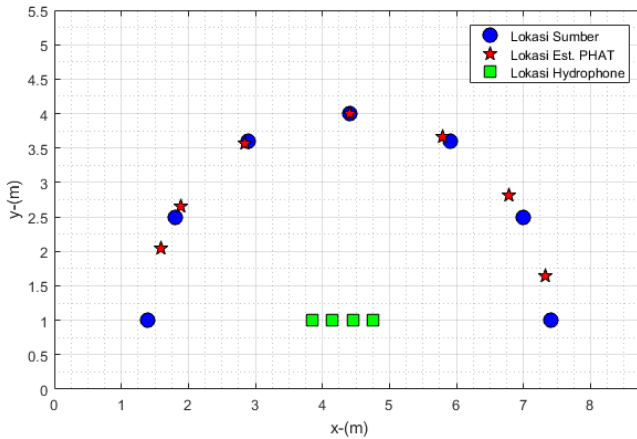
**Gambar 4.19** Grafik pengaruh jarak terhadap TTB pada proses pencarian medan bebas di udara

jarak tersebut pengurangan pada variasi sudut -30, 0, 30 derajat berturut-turut sebesar 6.4, 6, 6.5 dB. Dari hasil pengukuran, jarak minimal antara *speaker* dan sensor minimal sebesar 1 meter dengan nilai tingkat tekanan bunyi maksimal yang dihasilkan tidak lebih dari 84 dB. Pada penelitian ini, digunakan jarak pengukuran sebesar 3 meter dengan tingkat tekanan bunyi referensi sebesar 84 dB pada jarak 1 meter.

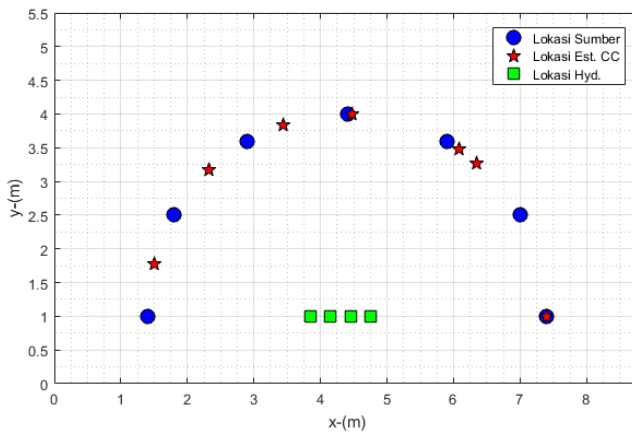
#### 4.7.2 Pelacakan Posisi Sumber Suara di Udara

Setelah jarak pengukuran dan tingkat tekanan bunyi yang harus dibangkitkan telah diketahui, kemudian dilakukan pengambilan data pelacakan posisi sumber suara di udara. Pelacakan yang dimaksud adalah deteksi sudut sumber suara (*speaker*) relatif terhadap sensor. Nilai sudut diperoleh berdasarkan konversi waktu tunda dari perhitungan CC dan PHAT seperti pada bab 3. Terdapat dua skenario pengujian yang dilakukan yakni pengujian luar ruangan dan pengujian di dalam ruangan. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh pantulan terhadap performa pelacakan sumber suara.

- Pengujian Luar Ruangan



**Gambar 4.20** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di luar ruangan



**Gambar 4.21** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di luar ruangan

Hasil pengujian di luar ruangan didapatkan hasil pelacakan seperti pada **Gambar 4.20** dan **4.21**, dapat dilihat pada grafik tersebut bahwa pelacakan sudut oleh CC maupun PHAT telah

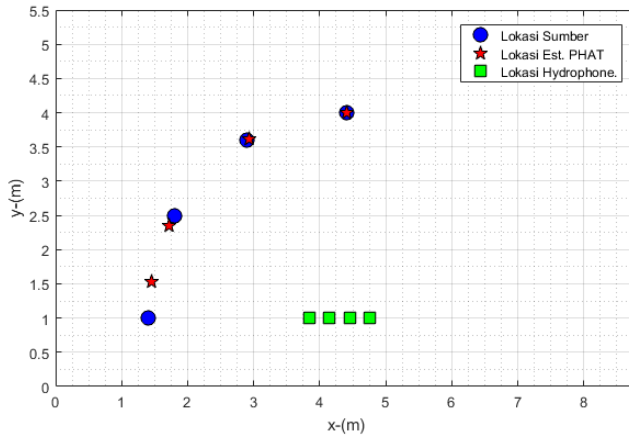
mengikuti nilai sudut acuan yang ditetapkan meskipun masih terdapat *error* pembacaan di setiap sudutnya. Dapat dilihat pada **Tabel 4.4**, *error* terbesar terjadi ketika sensor membaca sudut 0 dan 180 derajat dengan nilai berturut-turut sebesar 12.36 derajat dan 20.37 derajat. Sementara *error* pelacakan terkecil terjadi ketika pembacaan sudut 90 derajat dimana *error* pelacakan sebesar 0 derajat. *Error* yang terjadi pada sudut 0 dan 180 derajat terjadi diduga akibat peletakan sensor segaris dengan sumber sehingga sensitifitas penangkapan suara oleh hidrofons *array* menjadi berkurang sehingga waktu tunda tidak terbaca secara jelas.

**Tabel 4.4** Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di luar ruangan dengan lintasan setengah lingkaran (dalam derajat)

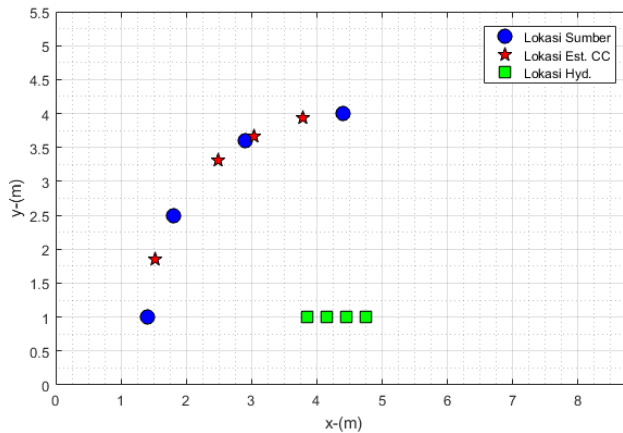
Sudut Sumber	Pembacaan CC	Pembacaan PHAT	Stdev CC	Stdev PHAT	Error CC	Error PHAT
0	0.00	12.36	0.00	11.85	0.00	12.36
30	49.39	37.30	7.40	2.27	19.39	7.30
60	55.96	62.33	7.80	2.04	4.04	2.33
90	88.50	90.00	2.56	0.00	1.50	0.00
120	108.72	121.37	4.18	1.60	11.28	1.37
150	133.77	146.67	13.79	2.28	16.23	3.33
180	164.84	159.63	14.56	4.05	15.16	20.37

Untuk *error* pembacaan sudut 30, 60, 90, 120, dan 150 derajat, relatif kecil karena gelombang yang datang tepat pada daerah yang memiliki *gain* tangkapan sinyal yang lebih tinggi. *Error* pelacakan terjadi diduga karena tingginya *background noise* pada lingkungan tempat data diambil dan pengaruh posisi sumber terhadap pola keterarahan hidrofons *array*. Pada saat pengukuran didalam ruangan, SNR sebesar 20 dB dan diluar ruangan sebesar 19 dB. Dari hasil pelacakan posisi sumber suara di luar ruangan, perhitungan menggunakan PHAT memberikan estimasi sudut yang lebih baik dibandingkan dengan metode CC.

- Pengujian Dalam Ruangan



**Gambar 4.22** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di dalam ruangan



**Gambar 4.23** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di dalam ruangan

Hasil pengujian di dalam ruangan didapatkan hasil pelacakan seperti pada **Gambar 4.22** dan **4.23**, dapat dilihat pada grafik

tersebut bahwa pelacakan sudut oleh CC maupun PHAT telah mengikuti nilai sudut acuan yang ditetapkan meskipun masih terdapat *error* pembacaan di setiap sudutnya. Dapat dilihat pada **Tabel 4.4**, *error* terbesar terjadi ketika sensor membaca sudut 180 derajat dengan nilai sebesar 11.48 derajat. Sementara *error* pelacakan terkecil terjadi ketika pembacaan sudut 90 derajat dimana *error* pelacakan sebesar 0 derajat. *Error* yang terjadi pada sudut 180 derajat terjadi diduga akibat peletakan sensor segaris dengan sumber sehingga sensitifitas penangkapan suara oleh hidrofon *array* menjadi berkurang sehingga waktu tunda tidak terbaca secara jelas. Dari hasil pelacakan posisi sumber suara di luar ruangan, perhitungan menggunakan PHAT memberikan estimasi sudut yang lebih baik dibandingkan dengan metode CC.

**Tabel 4.5** Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di dalam ruangan dengan lintasan setengah lingkaran (dalam derajat)

Sudut Sumber	Pembacaan CC	Pembacaan PHAT	Stdev CC	Stdev PHAT	Error CC	Error PHAT
90	101.47	83.88	51.22	2.87	11.47	6.12
120	115.17	117.69	11.63	0.99	4.83	2.31
150	129.58	148.77	54.68	2.49	20.42	1.23
180	126.90	168.52	31.73	3.82	53.10	11.48

Jika kedua hasil pengujian dibandingkan, dapat dilihat bahwa secara umum pelacakan sudut didalam ruangan memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan pembacaan sudut diluar ruangan. Dari hasil tersebut diduga bahwa hal yang mempengaruhi akurasi pelacakan adalah *background noise* yang ada pada lingkungan. Sementara efek pantulan yang terjadi dapat tidak mempengaruhi perhitungan PHAT sebaliknya metode CC belum dapat melacak sudut dengan baik pada tempat yang memiliki waktu dengung tinggi.

## 4.8 Hasil Pelacakan Posisi Sumber Suara di Air

### 4.8.1 Pencarian Medan Bebas

Pengukuran medan bebas dilakukan sesuai dengan skema pada **Gambar 3.9** dimana hanya saja diukur pada sudut 0 derajat dan 3 variasi jarak. Dari hasil pencarian medan bebas di air didapatkan hasil seperti pada **Tabel 4.6**. Pada pengukuran ini, pengurangan menjadi 6 dB terjadi pada saat jarak *speaker* dan sensor berubah dari 1 meter menjadi 2 meter.

**Tabel 4.6** Pencarian medan bebas (frekuensi referensi = 1000 Hz)

Jarak (m)	0.5	1	2
TTB (dB)	-32	-33	-39

**Tabel 4.7** Tingkat tekanan bunyi referensi sinyal uji jarak 1 meter (1000 Hz)

Frekuensi (Hz)	200	500	800	1000
TTB (dB)	-42	-39	-39	-33

Dari hasil pengukuran, jarak minimal antara *speaker* dan sensor dalam air minimal sebesar 1 meter dengan nilai tingkat tekanan bunyi maksimal yang dihasilkan tidak lebih dari -33 dB. Pada penelitian ini, digunakan jarak pengukuran sebesar 3 meter dengan tingkat tekanan bunyi referensi seperti pada **Tabel 4.7**.

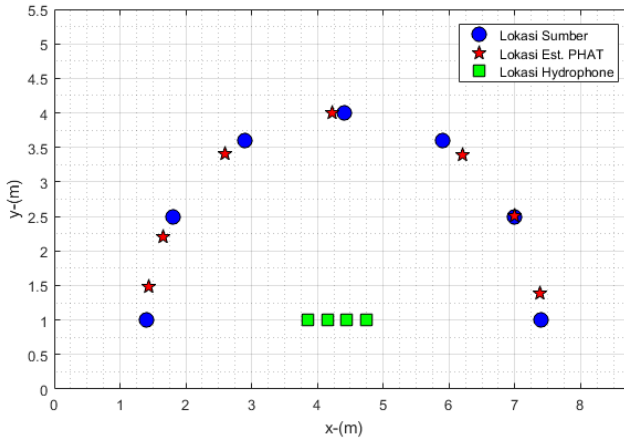
### 4.8.2 Pelacakan Posisi Sumber Suara di Air

Setelah jarak pengukuran dan tingkat tekanan bunyi yang harus dibangkitkan telah diketahui, kemudian dilakukan pengambilan data pelacakan posisi sumber suara di air. Kemudian dilakukan pengambilan data dengan skenario pada **Gambar 3.11** dan **3.12**. Terdapat tiga jenis variasi pengambilan data yakni pertama, sumber bunyi dibangkitkan secara diskrit (variasi sudut 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 derajat) lintasan setengah bola. Kedua, sumber bunyi dibangkitkan secara diskrit (variasi sudut 45, 64, 90, 116,

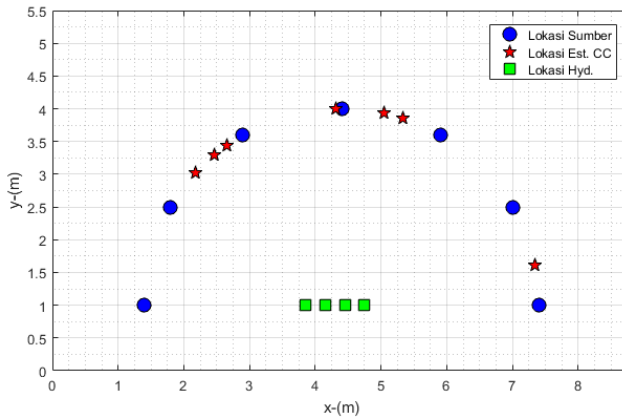


135 derajat) lintasan lurus. Ketiga, ketika sumber bunyi bergerak berupa kapal yang bergerak. Besar SNR pada kolam sebesar 25 dB.

- Pengujian Secara Diskrit Dengan Lintasan Setengah Lingkaran



**Gambar 4.24** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di kolam (lintasan setengah lingkaran)

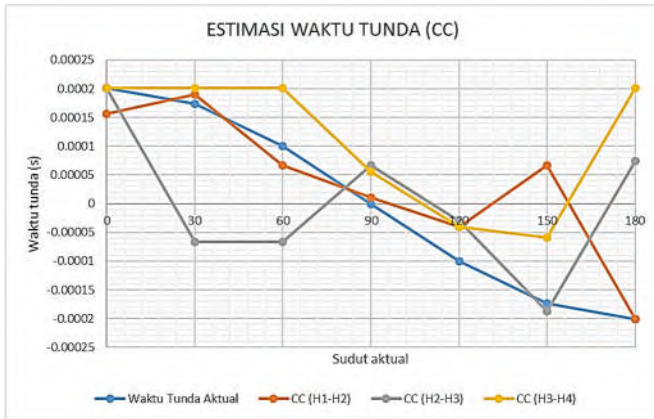


**Gambar 4.25** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan CC di kolam (lintasan setengah lingkaran)

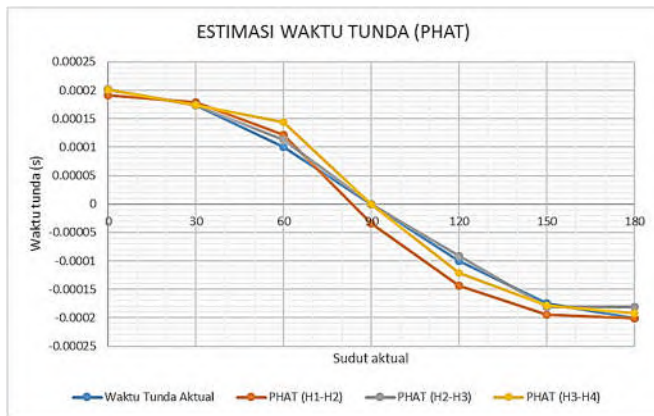
Hasil pengujian sumber bunyi diskrit di dalam air didapatkan hasil pelacakan seperti pada **Gambar 4.24** dan **4.25**, dapat dilihat pada grafik tersebut bahwa pelacakan sudut oleh PHAT telah mengikuti nilai sudut target meskipun masih terdapat *error* pembacaan di setiap sudutnya. Tetapi metode CC memiliki *error* pengukuran yang lebih besar jika dibandingkan dengan metode PHAT. Pada grafik tersebut estimasi sudut oleh PHAT lebih mendekati sudut sumber dibandingkan dengan estimasi yang dilakukan oleh CC. Hasil pengujian di dalam air untuk lintasan setengah lingkaran didapatkan hasil pembacaan yang cukup baik menggunakan metode PHAT. Pelacakan terbaik ketika pembacaan sudut 90 derajat dimana *error* pembacaannya sebesar 0 derajat dengan tingkat presisi sebesar 0 derajat. Sebenarnya *error* terkecil terjadi ketika pembacaan sudut 30 derajat, tetapi tingkat presisinya cukup rendah yakni sebesar 3.68 derajat. Seperti halnya pada percobaan di udara, pelacakan pada sudut 0 dan 180 derajat mengalami *error* yang cukup tinggi yakni masing-masing sebesar 7.42 dan 9.43 derajat. *Error* ini terjadi diduga seperti kejadian saat pembacaan waktu tunda di udara yakni karena hidrofoni *array* berada pada posisi segaris dengan sumber.

**Tabel 4.8** Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di kolam dengan lintasan setengah lingkaran (dalam derajat)

Sudut Sumber	Pembacaan CC	Pembacaan PHAT	Stdev CC	Stdev PHAT	Error CC	Error PHAT
0	11.76	7.42	12.48	4.96	11.76	7.42
30	77.49	30.04	41.04	3.68	47.49	0.04
60	71.90	53.07	46.47	1.39	11.90	6.93
90	91.50	93.33	17.53	0.00	1.50	3.33
120	130.12	126.79	18.96	0.00	10.12	6.79
150	137.66	156.45	20.67	5.60	12.34	6.45
180	125.69	170.80	49.57	2.34	54.31	9.20



**Gambar 4.26** Estimasi waktu tunda menggunakan CC

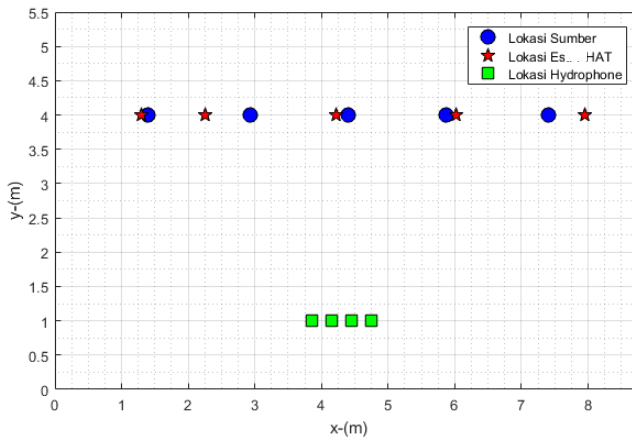


**Gambar 4.27** Estimasi waktu tunda menggunakan PHAT

Sebelum dikonversi menjadi nilai sudut, terlebih dahulu didapatkan nilai waktu tunda pada masing-masing pasangan hidrofon pada kondisi SNR 19 dB seperti **Gambar 4.26 dan 4.27**. Jika dibandingkan dengan **Gambar 4.15, 4.16, dan 4.17**, diperoleh hasil yang berbeda antara hasil percobaan dengan simulasi. Seharusnya, pada kondisi SNR 19 dB pasangan sensor dapat mengestimasi waktu tunda menggunakan algoritma CC maupun PHAT sesuai dengan kondisi waktu tunda aktualnya.

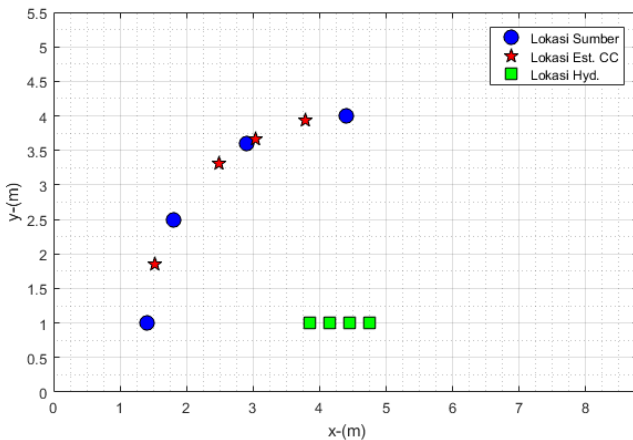
Hasil yang mendekati kondisi aktual diperoleh menggunakan algoritma PHAT seperti ditunjukkan **Gambar 4.27**. Sementara, hasil yang kurang baik diperoleh menggunakan algoritma CC dimana terdapat beberapa hasil estimasi yang cukup jauh dari kondisi aktualnya sehingga menyebabkan nilai *error* yang cukup tinggi.

- Pengujian Secara Diskrit Dengan Lintasan Lurus



**Gambar 4.28** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di kolam (lintasan lurus)

Hasil pengujian di dalam air untuk lintasan lurus didapatkan hasil pembacaan yang cukup baik. Dapat dilihat pada **Gambar 4.28** dan **4.29** bahwa *error* terbesar terjadi saat pembacaan sudut 116 derajat yakni sebesar 9.48 derajat. Pengujian ini membuktikan bahwa perubahan jarak tidak berpengaruh signifikan terhadap pembacaan sudut sumber suara. Dapat dilihat pada **Tabel 4.9** pada sudut yang diujikan, *error* yang terbaca sebesar 4.86, 2.34, 3.33, dan 0.93 derajat. Tetapi tingkat presisi yang kurang baik ditunjukkan ketika pembacaan sudut 135 derajat dimana standar deviasi pembacaan mencapai nilai 13 derajat. Nilai standar deviasi menunjukkan kedekatan nilai tiap pengukuran semakin besar nilai standar deviasi maka hasil pengukuran semakin tidak presisi.



**Gambar 4.29** Grafik pelacakan sudut dengan perhitungan PHAT di kolam (lintasan lurus)

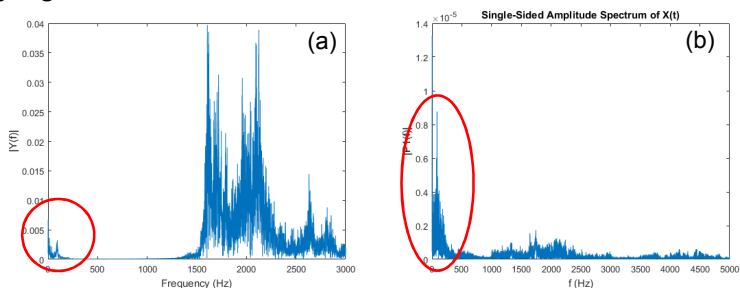
Untuk hasil pelacakan di air, *error* perhitungan CC menjadi tidak akurat akibat pengaruh pantulan pada dinding kolam. Karena metode CC berjalan baik pada sinyal yang memiliki tingkat korelasi tinggi, maka sinyal pantulan yang dianggap sebagai *noise* menjadi tidak berkorelasi sehingga pembacaan waktu tunda menjadi terganggu. Dari hasil yang telah diperoleh, secara keseluruhan estimasi waktu tunda menggunakan PHAT lebih baik dibandingkan menggunakan metode CC.

**Tabel 4.9** Hasil pelacakan sudut dengan perhitungan CC dan PHAT di kolam dengan lintasan lurus (dalam derajat)

Sudut Sumber	Pembacaan CC	Pembacaan PHAT	Stdev CC	Stdev PHAT	Error CC	Error PHAT
45	70.11	40.14	28.73	0.00	25.11	4.86
64	73.10	61.66	0.00	0.00	9.10	2.34
90	91.50	93.33	17.53	0.00	1.50	3.33
116	136.95	125.48	28.80	1.01	20.95	9.48
135	118.45	135.93	24.90	13.81	16.55	0.93

- Pengujian Secara Bergerak Dengan Lintasan Lurus

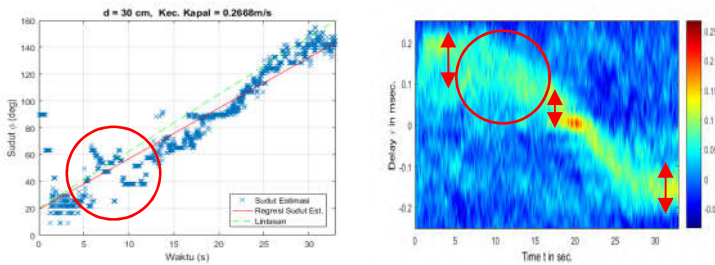
Setelah dilakukan pelacakan sumber bunyi secara diskrit, dilanjutkan dengan pengujian sumber bunyi secara bergerak. Objek yang dilacak pada percobaan ini adalah sebuah kapal selam *remote control* yang bergerak seperti skema pada **Gambar 3.12**. Pada tahap ini hanya digunakan perhitungan PHAT untuk estimasi sumber bunyi bergerak bawah air, dikarenakan pada percobaan sebelumnya PHAT memiliki performa yang lebih baik dalam mengestimasi sudut datang. Terdapat 2 skenario gerak yang dilakukan yakni gerak dari titik 1 menuju titik 2 dan, gerak dari titik 2 menuju ke titik 1. Didapatkan spektrum kapal selam seperti **Gambar 4.30** dimana frekuensi tertingginya sebesar 2000 Hz. Padahal seharusnya frekuensi dominan kapal dibawah 100 Hz, karena putaran propeller kapal sebesar 50-100 Hz. Perubahan frekuensi diduga terjadi akibat pengaruh pantulan pada dinding kolam karena dimensinya yang cukup kecil. Hal ini diperkuat oleh data pada **Gambar 4.30** dimana ketika dilakukan pengukuran dengan kapal RC yang berbeda tipe pada kolam yang sangat luas di MOB LHI, frekuensi dominan hanya pada frekuensi dibawah 100 Hz. Sementara, ketika dilakukan pengukuran di kolam Teknik Fisika didapatkan frekuensi maksimal sebesar 2000 Hz tetapi sinyal pada frekuensi rendah tetap muncul dengan nilai amplitudo yang lebih kecil.



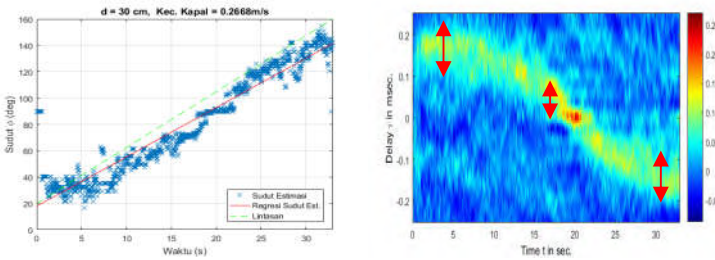
**Gambar 4.30** Grafik spektrum bunyi kapal *remote control* (a) di kolam Teknik Fisika (b) di kolam MOB LHI

Pada skenario pertama, pasangan hidrofon 1-2, hidrofon 2-3, dan hidrofon 3-4 sudah mampu melacak arah gerak kapal yakni

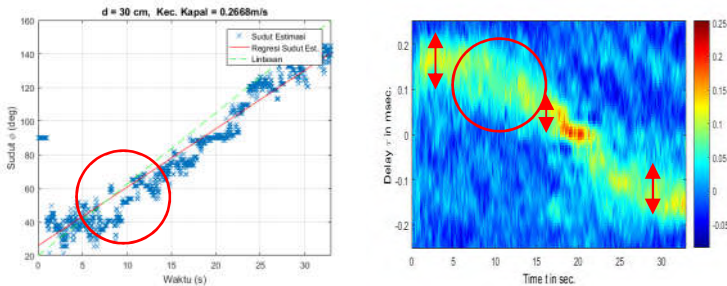
ketika kapal bergerak dari sudut 20 derajat terhadap sensor menuju sudut 160 derajat seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.31, 4.32, 4.33**. Selain itu, estimasi waktu tunda yang didapatkan telah mengikuti tren aktual dimana ketika kapal semakin jauh dari hidrofon *array* maka nilai waktu tundanya semakin membesar dan ketika mendekati hidrofon *array* maka waktu tundanya semakin kecil. Sudut estimasi yang terlacak, diambil persamaan regresinya dimana persamaan tersebut dianggap sebagai sudut yang terlacak.



**Gambar 4.31** Skenario 1(a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 1 dan 2 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 1 dan 2



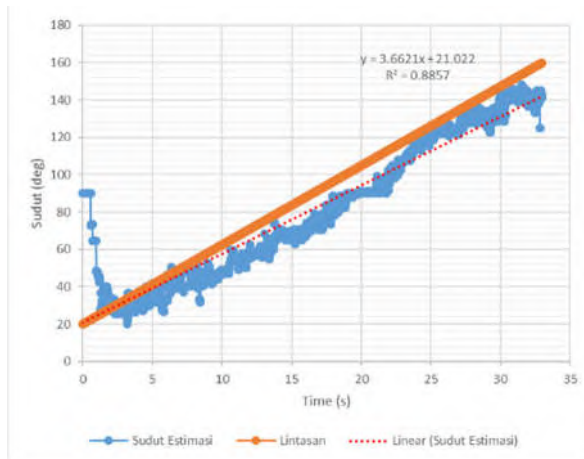
**Gambar 4.32** Skenario 1(a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 2 dan hidrofon 3 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 2 dan 3



**Gambar 4.33** Skenario 1(a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 3 dan hidrofon 4 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 3 dan 4

Dapat dilihat pada gambar (yang dilingkari) semakin terang warna grafik, waktu tunda yang terbaca juga semakin jelas sehingga pembacaan sudut menjadi lebih jelas. Warna semakin gelap (membiru) mengindikasikan bahwa waktu tunda yang terbaca mendekati 0 sehingga sudut yang terbaca menjadi bernilai 0. Dari ketiga gambar diatas dapat dilihat bahwa pada pasangan hidrofon 1-2, 2-3, dan 3-4 menunjukkan hasil estimasi sudut yang hampir sama, sehingga nilai tersebut dirata-rata menggunakan **Persamaan 2.34** sehingga dapat diperoleh nilai sudut pada masing-masing waktu. Kemudian nilai sudut yang terestimasi dari waktu ke -0 sampai ke -n dicari nilai regresinya, dimana nilai tersebut sebagai nilai sudut terestimasi. Dari hasil yang didapat seperti pada **Gambar 4.34**, penyimpangan sudut maksimum sebesar 15 derajat dari nilai yang sebenarnya, nilai ini ditunjukkan saat membaca sudut 160 derajat.





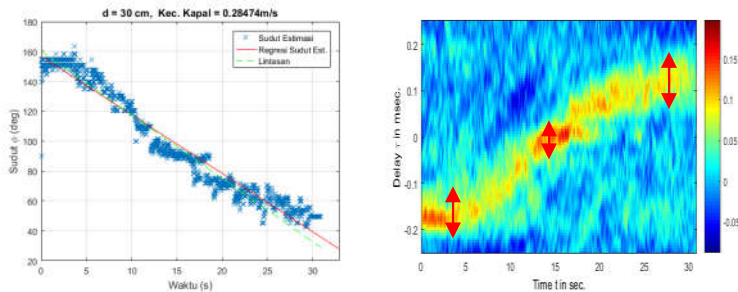
**Gambar 4.34** Lintasan kapal yang terlacak oleh hidrofon *array* (Skenario 1)

Hasil sudut yang terestimasi kemudian dirubah kedalam bentuk bearing agar sesuai dengan standar navigasi pada umumnya seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.10**. Kemudian, hasil sudut yang terestimasi pada **Gambar 4.34** dikonversi menjadi kedalam satuan bearing menggunakan persamaan pada **Tabel 2.2** sehingga didapatkan posisi kapal seperti pada **Tabel 4.10**. Diambil sampel waktu tiap 1 detik dalam pembacaan bearing kapal, sehingga tiap 1 detiknya posisi kapal dapat dilacak oleh sensor *array*.

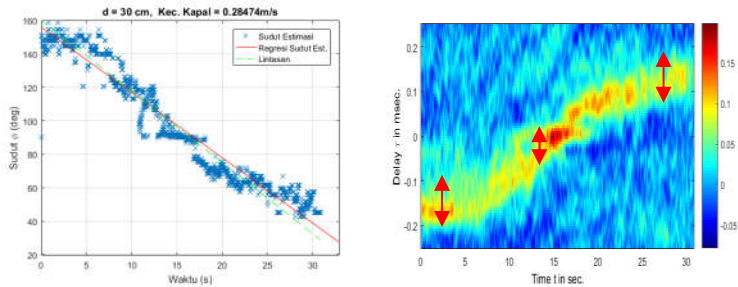
**Tabel 4.10** Bearing terukur pada skenario 1

Waktu (s)	Sudut Aktual (deg)	Sudut Terukur (deg)	Bearing Terukur (deg)	Error Sudut (deg)
0.00	20.00	21.02	N 21.02 W	-1.02
1.00	24.24	24.68	N 24.68 W	-0.44
2.00	28.48	28.35	N 28.34 W	0.14
3.00	32.73	32.01	N 32.00 W	0.72
4.00	36.97	35.67	N 35.67 W	1.30
5.00	41.21	39.33	N 39.33 W	1.88
6.00	45.45	42.99	N 42.99 W	2.46
7.00	49.70	46.66	N 46.65 W	3.04
8.00	53.94	50.32	N 50.31 W	3.62
9.00	58.18	53.98	N 53.98 W	4.20
10.00	62.42	57.64	N 57.64 W	4.78
11.00	66.67	61.31	N 61.30 W	5.36
12.00	70.91	64.97	N 64.96 W	5.94
13.00	75.15	68.63	N 68.62 W	6.52
14.00	79.39	72.29	N 72.29 W	7.10
15.00	83.64	75.95	N 75.95 W	7.68
16.00	87.88	79.62	N 79.61 W	8.26
17.00	92.12	83.28	N 83.27 W	8.84
18.00	96.36	86.94	N 86.93 W	9.42
19.00	100.61	90.60	S 89.39 W	10.00
20.00	104.85	94.26	S 85.73 W	10.58
21.00	109.09	97.93	S 82.07 W	11.16
22.00	113.33	101.59	S 78.41 W	11.74
23.00	117.58	105.25	S 74.74 W	12.32
24.00	121.82	108.91	S 71.08 W	12.91
25.00	126.06	112.57	S 67.42 W	13.49
26.00	130.30	116.24	S 63.76 W	14.07
27.00	134.54	119.90	S 60.10 W	14.65
28.00	138.79	123.56	S 56.43 W	15.23
29.00	143.03	127.22	S 52.77 W	15.81
30.00	147.27	130.89	S 49.11 W	16.39

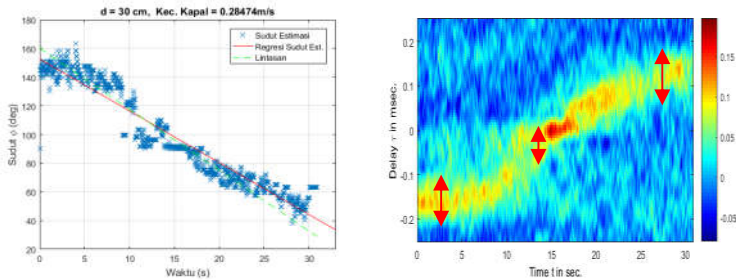
Pada variasi kedua, hidrofon 1-2, hidrofon 2-3, dan hidrofon 3-4 sudah dapat melacak arah gerak kapal yakni ketika kapal bergerak dari sudut 160 derajat terhadap sensor menuju sudut 20 derajat seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.35, 4.36, 4.37**. Selain itu, estimasi waktu tunda juga yang didapat juga mengikuti tren yang seharusnya dimana ketika kapal semakin jauh dari hidrofon *array* maka nilai waktu tundanya semakin membesar dan ketika mendekati hidrofon *array* maka waktu tundanya semakin kecil.



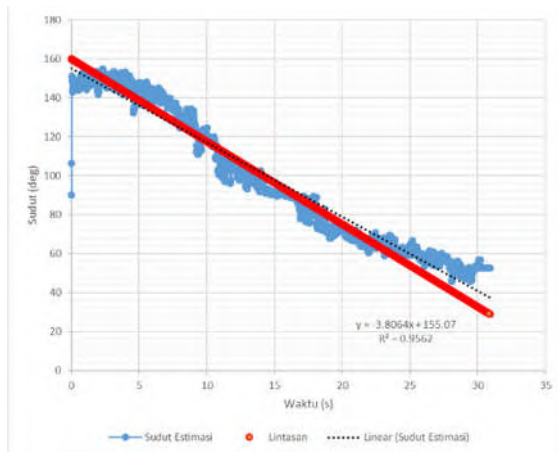
**Gambar 4.35** Skenario 2(a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 1 dan hidrofon 2 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 1 dan 2



**Gambar 4.36** Skenario 2(a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 2 dan hidrofon 3 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 2 dan 3



**Gambar 4.37** Skenario 2(a) Lintasan kapal terlacak oleh hidrofon 3 dan hidrofon 4 (b) Waktu tunda terestimasi oleh hidrofon 3 dan 4



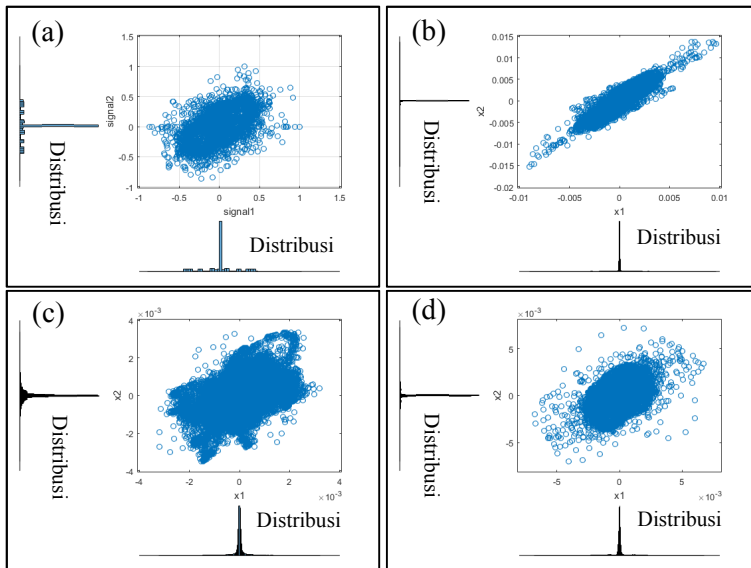
**Gambar 4.38** Lintasan kapal yang terlacak oleh hidrofon array (Skenario 2)

Pengolahan data pada skenario 2 sama seperti pada skenario 1 dimana didapatkan hasil *error* pembacaan maksimal sebesar 10 derajat pada saat pembacaan sudut 20 derajat seperti yang ditunjukkan **Gambar 4.38**. Cara yang sama seperti skenario 1 juga dilakukan untuk mengkonversi sudut menjadi bearing.

**Tabel 4.11** Bearing terukur pada skenario 2

Waktu (s)	Sudut Aktual (deg)	Sudut Terukur (deg)	Bearing Terukur (deg)	Error Sudut (deg)
0.00	160.00	155.07	S 24.93 W	4.93
1.00	155.76	151.26	S 28.73 W	4.494
2.00	151.52	147.46	S 32.54 W	4.058
3.00	147.27	143.65	S 36.34 W	3.622
4.00	143.03	139.84	S 40.15 W	3.186
5.00	138.79	136.04	S 43.96 W	2.75
6.00	134.55	132.23	S 47.76 W	2.314
7.00	130.30	128.43	S 51.57 W	1.878
8.00	126.06	124.62	S 55.38 W	1.442
9.00	121.82	120.81	S 59.18 W	1.006
10.00	117.58	117.01	S 62.99 W	0.57
11.00	113.33	113.20	S 66.80 W	0.134
12.00	109.09	109.39	S 70.60 W	-0.302
13.00	104.85	105.59	S 74.41 W	-0.738
14.00	100.61	101.78	S 78.21 W	-1.174
15.00	96.36	97.97	S 82.02 W	-1.61
16.00	92.12	94.17	S 85.83 W	-2.046
17.00	87.88	90.36	S 89.63 W	-2.482
18.00	83.64	86.55	N 86.55 W	-2.918
19.00	79.39	82.75	N 82.74 W	-3.354
20.00	75.15	78.94	N 78.94 W	-3.79
21.00	70.91	75.14	N 75.13 W	-4.226
22.00	66.67	71.33	N 71.32 W	-4.662
23.00	62.42	67.52	N 67.52 W	-5.098
24.00	58.18	63.72	N 63.71 W	-5.534
25.00	53.94	59.91	N 59.91 W	-5.97
26.00	49.70	56.10	N 56.10 W	-6.406
27.00	45.46	52.30	N 52.29 W	-6.842
28.00	41.21	48.49	N 48.49 W	-7.278
29.00	36.97	44.68	N 44.68 W	-7.714
30.00	32.73	40.88	N 40.87 W	-8.15

## 4.9 Pembahasan



**Gambar 4.39** Distribusi data sinyal uji pasangan hidrofon 2-3 (a) Sinyal simulasi (b) Sinyal pada sudut  $90^\circ$  (c) Sinyal pada sudut  $60^\circ$  (d) Sinyal pada sudut  $30^\circ$

Pada proses pelacakan sumber bunyi bergerak bawah air berdasarkan estimasi waktu tunda didapatkan hasil estimasi yang berbeda dengan proses simulasi. Ketika nilai SNR di udara luar ruangan, dalam ruangan, dan didalam air berturut-turut sebesar 19, 20, 25 dB pembacaan oleh CC dan PHAT seharusnya pembacaan waktu tunda dapat dilakukan oleh kedua metode. Jika dilihat dari hasil eksperimen, PHAT memberikan performa pelacakan yang lebih baik dibandingkan dengan metode CC. Terdapat hipotesa yang menyebabkan terjadinya *error* pembacaan sudut pada kolam, yakni pengaruh *scattering* pada kolam dan pengaruh keterarahan tangkapan bunyi dari hidrofon *array*. Hal ini diperkuat dengan berubahnya distribusi data dan koefisien korelasi dari sinyal terekam pada air kolam.

Pada **Gambar 4.39** terlihat bahwa semakin menjauhi puncak *gain* dari hidrofon *array* maka distribusi sinyal yang tertangkap semakin mendekati Gaussian. Berubahnya nilai distribusi diduga akibat pengaruh pola tangkapan yang diterima hidrofon *array*, ketika dibangkitkan sinyal pada sudut 90 derajat, nilai korelasi 2 sinyal dari hidrofon sebesar 0.9. Pada sudut 60 dan 30 derajat, nilai korelasinya masing-masing sebesar 0.44 dan 0.0236. Padahal, koefisien sinyal simulasi pada SNR 20 dB menunjukkan nilai 0.7. Perbedaan ini terjadi disebabkan simulasi dianggap pada kondisi yang ideal. Agar mendapatkan hasil estimasi yang maksimal, seharusnya dua sinyal yang dikorelasikan harus memiliki nilai korelasi yang kuat. *Noise* yang ditangkap oleh hidrofon kemudian dianggap oleh perhitungan sebagai sinyal yang berkorelasi antara satu sama lain sehingga mempengaruhi estimasi waktu tunda pada metode CC. Pada metode PHAT hanya informasi fase yang disimpan setelah *prefiltering* menggunakan filter PHAT sehingga PHAT tidak begitu terpengaruh oleh korelasi suara aditif, sehingga ketika perubahan lingkungan terjadi PHAT memberikan hasil estimasi waktu tunda yang baik (Yushi, 2005).

Waktu tunda yang terbaca (**Gambar b**) pada proses pelacakan ditunjukkan oleh bagian yang berwarna terang. Setiap benda bersuara yang bergerak relatif terhadap pendengar (sensor), akan mengalami efek Doppler yang ditandai dengan berubahnya frekuensi sumber. Terjadi efek doppler ketika kapal bergerak relatif terhadap sensor, tetapi perubahan frekuensi yang terjadi sangatlah kecil. Hal ini dikarenakan, sumber bergerak dengan kecepatan yang cukup rendah (0.28 m/s) jika dibandingkan dengan kecepatan bunyi dalam air (1492.1 m/s). Secara perhitungan, jika kapal bergerak semakin cepat maka akan mengganggu pembacaan waktu tunda dikarenakan terjadi perubahan frekuensi pada fungsi waktu pada setiap sensor.

Untuk pelacakan sumber bunyi bergerak bawah air dengan lintasan lurus didapatkan hasil yang cukup baik. Arah gerak, kecepatan, dan sudut kapal dapat dilacak oleh sensor *array* dengan *error* maksimal sebesar 20 derajat. Tetapi hasil estimasi masih berupa data sudut yang acak (*scatter*) tetapi mengarah pada suatu

nilai tertentu sehingga dapat ditarik garis regresi sebagai hasil sudut yang terlacak. Hasil berbeda didapatkan ketika pembacaan sumber bunyi yang tidak bergerak, dimana nilainya konstan pada sudut tertentu saja. Nilai acak tersebut terjadi dikarenakan ketika kapal bergerak, maka medium yang dilewatinya juga ikut bergerak sehingga arah penjaran gelombang juga ikut berubah dan menyebabkan nilai pembacaan waktu tunda juga tidak stabil pada satu nilai saja. Lebar *error* waktu tunda yang terbaca berkisar 0.1 ms nilai inilah yang menyebabkan terjadinya hasil pembacaan sudut yang acak. Lebar *error* waktu tunda yang terbaca menjadi semakin kecil ketika objek mendekati sensor sehingga pembacaan sudut menjadi lebih terarah ke satu titik saja. Sama halnya dengan pembacaan pada sudut 90 derajat untuk sumber tidak d Bergerak, dimana sudut yang didapatkan *error* nya cukup kecil. Diketahui juga bahwa kecepatan kapal sebesar 0.2 m/s dan arah pergerakan kapal juga dapat dideteksi berdasarkan data sudut yang terestimasi, kapal bergerak menuju ke titik 2 apabila sudut yang terestimasi semakin besar, dan begitupula sebaliknya ketika kapal bergerak menuju ke titik 1.



*Halaman ini memang dikosongkan.*

# LAMPIRAN A

## Data Spesifikasi M-Audio Fast Track Ultra



### Specifications

*All specs measured at 48kHz sampling rate unless otherwise stated*

#### Mic Inputs (A/D)

- Input Impedance 1.7k ohms unbalanced, 3.4k ohms balanced
- Maximum Input Level from +21dBu @ min gain (with pad) to -50dBu @ max gain (no pad)
- Channel-to-Channel Crosstalk < -110dB
- SNR (min gain, no pad) -103dB, A-weighted
- Dynamic Range (min gain, no pad) 103dB, A-weighted
- THD+N (min gain, no pad) 0.002% (-94dB) @ -1dBFS, 1kHz
- Frequency Response 20Hz to 20kHz, +/- 0.1dB
- Preamp Gain > 60dB
- Pad -20dB

### **Instrument Inputs (A/D)**

- Input Impedance 1M ohm, unbalanced
- Maximum Input Level from +14dBV @ min gain (no pad) to -40dBV @ max gain (no pad)
- SNR (min gain, no pad) -103dB, A-weighted
- Dynamic Range (min gain, no pad) 103dB, A-weighted
- THD+N (min gain, no pad) 0.005% (-86dB) @ -1dBFS, 1kHz
- Frequency Response 20Hz to 20kHz, +/- 0.1dB @ 48kHz sample rate
- Preamp Gain >45dB
- Pad -20dB

### **Line Inputs (A/D)**

- Input Impedance 28k ohm balanced / 20k ohm unbalanced
- Maximum Input Level +3.4dBu, balanced/+1.2dBV, unbalanced
- Channel-to-Channel Crosstalk < -110dB
- SNR -103dB, A-weighted
- Dynamic Range 103dB, A-weighted
- THD+N 0.002% (-94dB) @ -1dBFS, 1kHz
- Frequency Response 20Hz to 20kHz, +/- 0.1dB

### **Input Inserts (analog)**

- Maximum Level Send +6dBV, unbalanced
- Maximum Level Return +6dBV, unbalanced
- THD+N 0.002% (-94dB) @ -1dB from max level, 1kHz
- Frequency Response 20Hz to 20kHz, +/- 0.1dB

### **Line Outputs (D/A)**

- Output Impedance 150 ohms, unbalanced / 300 ohms, balanced
- Maximum Output Level +10dBu, balanced  
+1.8dBV, unbalanced
- Channel-to-Channel Crosstalk < -100dB
- SNR -104 dB, A-weighted
- Dynamic Range 104dB, A-weighted
- THD+N 0.002% (-94dB) @ -1dBFS, 1kHz
- Frequency Response 20Hz to 20kHz, +/- 0.1dB

### **Headphone Output (D/A)**

- Maximum Output 0dBV at THD < 0.05% into 32 ohms
- Channel-to-Channel Crosstalk < -55dB
- Frequency Response 20Hz to 20kHz, +/- 0.7dB
- Working Range 24 to 600 ohms

## Data Spesifikasi *Hydrophone* **Aquarian H2a-XLR**



Sensitivity	: -180dB re: 1V/mPa (+/- 4dB 20Hz-
4.5KHz)	
Useful range	: <10 Hz to >100KHz (not measured above 100KHz, approximate sensitivity @100KHz = -220dB re: 1V/mPa)
Polar Response	: Omnidirectional (horizontal)
Operating depth	: <80 meters
Output impedance	: 1 KΩ (typical)
Power	: 0.6 mA (typical)
Physical	: (cable and output plug excluded)
Dimensions	: 25mm x 46mm
Mass	: 105 grams
Specific Gravity	: 5.3

## Data Spesifikasi *Underwater Speaker* Daravoc MA001



### Product Information:

### Specifications:

- Cable: UL2464 AWG22/2C
- Cable length: 33.3 feet.
- For MA001A, the cable length is 14.5 feet, extended to 29 feet
- Frequency Response: 100 - 10,000 Hz
- Impedance: 4 Ohms/8 Ohms
- Temperature Resistant: up to 176 0F
- Model MA001 & MA001A Max. Input Power: 20 Watts

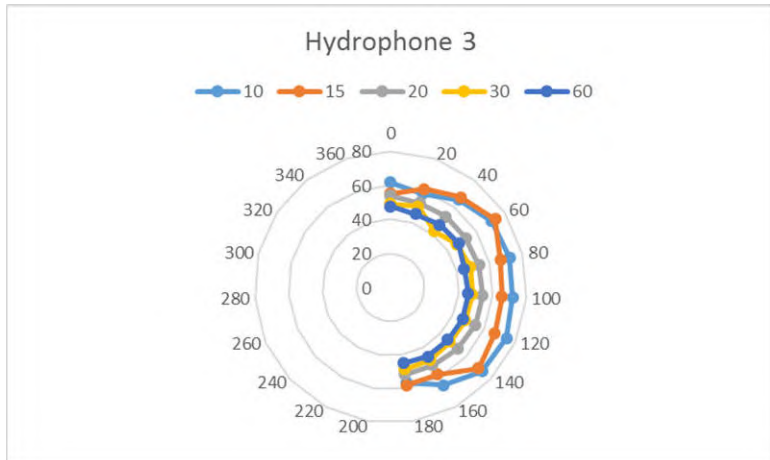
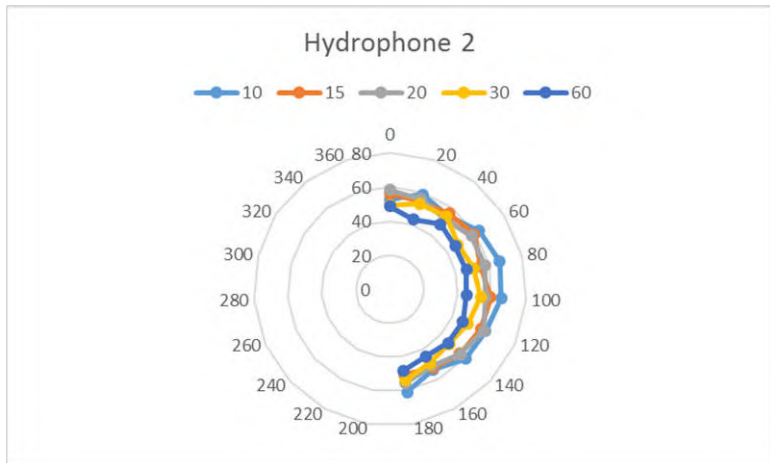
## Data Spesifikasi Kapal Selam Remote Control



- Product Name: US Remote Control Nuclear Submarine
- Product Dimensions: 35X9X9CM, Diving Depth: 1 meter
- Packaging: Color Gifts Window Box
- Product Accessories: Submarines + Remote control + Color box + Instructions
- Product Material: ABS + Electronic Devices
- Battery: Submarines four AA batteries (own), Remote Control Working with sections one 9V block battery
- Weight: 1.6KG

## LAMPIRAN B

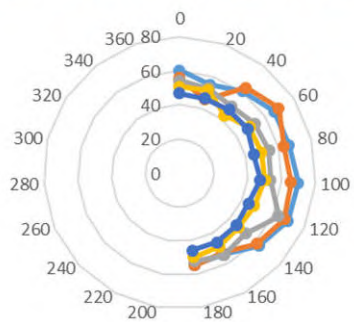
### 1. Keterarahan Hidrofon 2, 3, dan 4.





### Hydrophone 4

10 15 20 30 60



## LAMPIRAN C

**Tabel A** Estimasi waktu tunda bawah air menggunakan 4 hidrofons

Sudut Akt.	Waktu tunda Aktual	CC (H1-H2)	PHAT (H1-H2)	CC (H2-H3)	PHAT (H2-H3)	CC (H3-H4)	PHAT (H3-H4)
0	0.000201059	0.00016275	0.00019157	0.00020106	0.000201059	0.00020106	0.000201059
		0.00014386	0.00019157	0.00020106	0.000201059	0.00020106	0.000201059
		0.00016275	0.00019157	0.00020106	0.000201059	0.00020106	0.000201059
30	0.000174122	0.00019157	0.000178506	0.00020106	0.000181406	0.00020106	0.000178506
		0.00017851	0.000178506	-0.0002011	0.000181406	0.00020106	0.000178506
		0.00020106	0.000178506	-0.0002011	0.00015873	0.00020106	0.000162751
60	0.000100529	0.00020106	0.000121477	0.00020106	0.000113379	0.00020106	0.000143863
		-0.0002011	0.000121477	-0.0002011	0.000113379	0.00020106	0.000143863
		0.00020106	0.000121477	-0.0002011	0.000113379	0.00020106	0.000143863
90	1.23164E-20	1.2316E-20	-3.37464E-05	0.00020106	1.23164E-20	6.5962E-05	1.23164E-20
		3.3746E-05	-3.37464E-05	-0.0002011	1.23164E-20	6.5962E-05	1.23164E-20
		1.2316E-20	-3.37464E-05	0.00020106	1.23164E-20	3.3746E-05	1.23164E-20

120	- 0.000100529	-0.0001215	-0.000143863	-9.07E-05	-9.07029E-05	-0.0001215	-0.000121477
		0.00020106	-0.000143863	-0.0002011	-9.07029E-05	0.00020106	-0.000121477
		-0.0002011	-0.000143863	0.00020106	-9.07029E-05	-0.0002011	-0.000121477
150	- 0.000174122	0.00020106	-0.00019157	-0.0001814	-0.000181406	0.00020106	-0.000178506
		-0.0002011	-0.000201059	-0.0002011	-0.000181406	-0.0001785	-0.000178506
		0.00020106	-0.00019157	-0.0001814	-0.000181406	-0.0002011	-0.000178506
180	- 0.000201059	-0.0002011	-0.000201059	0.00020106	-0.000181406	0.00020106	-0.00019157
		-0.0002011	-0.000201059	0.00020106	-0.000181406	0.00020106	-0.00019157
		-0.0002011	-0.000201059	-0.0001814	-0.000181406	0.00020106	-0.00019157

### Keterangan:

CC (Hi-Hj) : Estimasi waktu tunda hidrofon i dan hidrofon j menggunakan CC

PHAT (Hi-Hj) : Estimasi waktu tunda hidrofon i dan hidrofon j menggunakan PHAT

## **LAMPIRAN D**

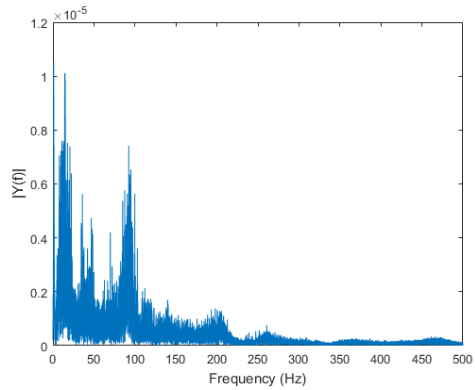
### **Program Matlab dan contoh file rekaman**

Bisa di unduh di link berikut:

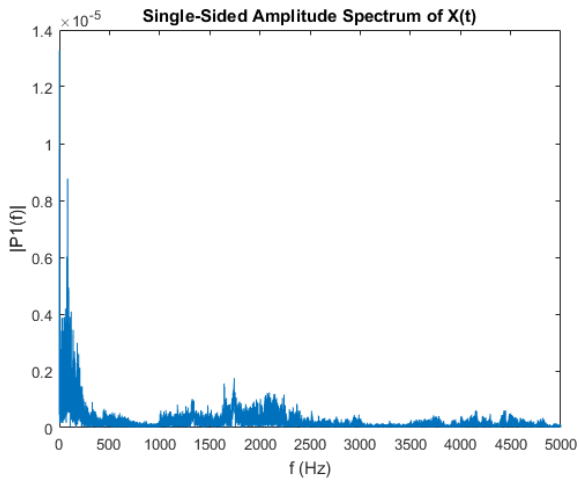
<https://github.com/saptianr/Tugas-Akhir>

## LAMPIRAN E

### Spektrum pada kolam Teknik Fisika setelah dipotong sampai frekuensi 500 Hz

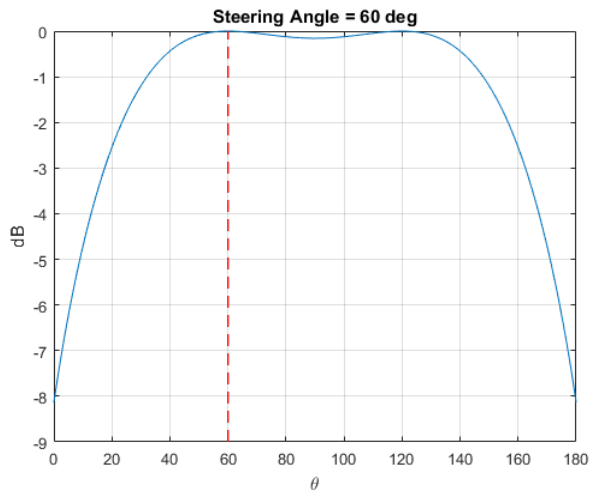
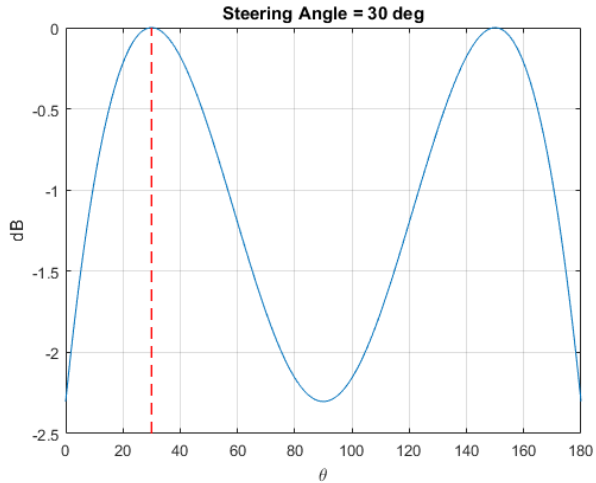


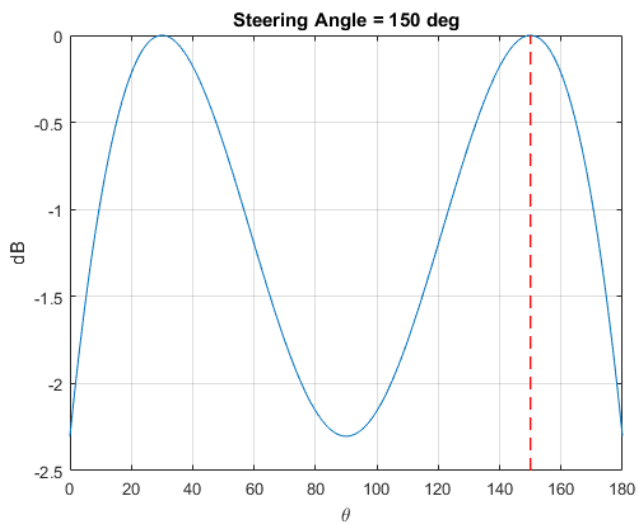
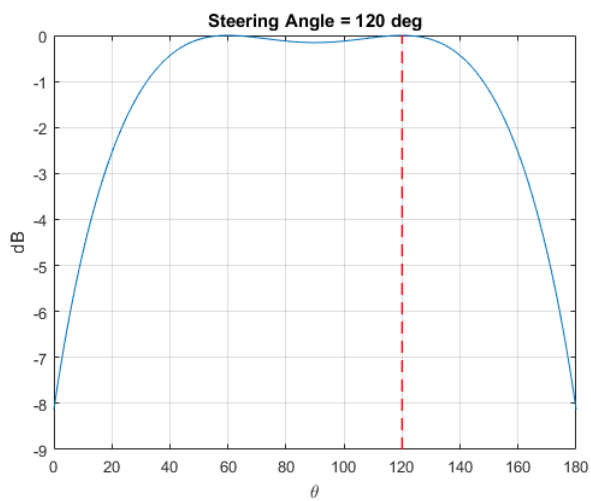
### Spektrum pada kolam MOB LHI

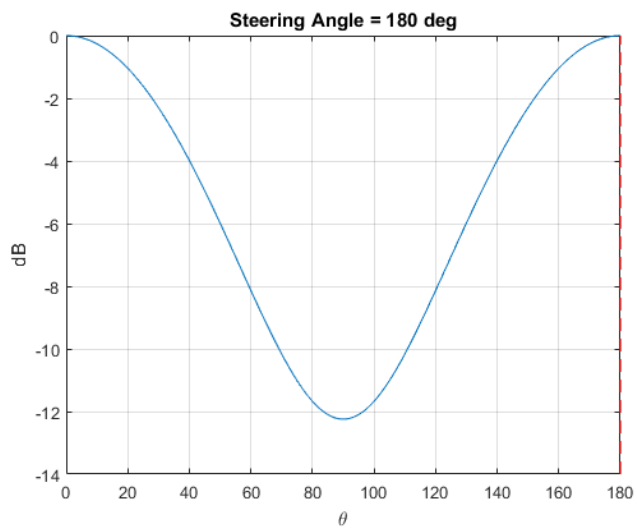


## LAMPIRAN F

**Sinyal keluaran M=4 hidrofona array dalam air ketika mengarah pada sudut 30, 60, 120, 150, 180 derajat**









## DAFTAR PUSTAKA

- Andrew. (2016 June 20). **Delay and Sum Noise**. Retrieved from <http://www.labbookpages.co.uk>.  
<http://www.labbookpages.co.uk/audio/noise/delaySum.html>.
- Anonym. (2016 June 20). **Correlation+Coefficient**. Retrieved from <https://psychlopedia.wikispaces.com>.  
<https://psychlopedia.wikispaces.com/Correlation+Coefficient>
- Anonym. (2016 June 20). **natureofgeoinfo**. Retrieved from [www.e-education.psu.edu](http://www.e-education.psu.edu).  
[https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5\\_p7.html](https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5_p7.html)
- Chandak, Anis. 2006. **“Sound Localization Using Microphone Arrays,”** Chapel Hill: The University of North Carolina. Power point file
- C. H. Knapp dan G. C. Carter. 1976. **“The generalized corelation method for estimation of time delay,”** *IEEE Transactions on Acoustics,*, vol. 24, p. 4, 1976.
- C. Lin, L. Yongchun, K. Fancheng. 2011. **“Acoustic Source Localization Based on Generalized Crosscorrelation Time-delay Estimation,”** *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 4912-4919, 2011.
- Farina. 2000. **“Simultaneous Measurement Of Impulse Response And Distorsion With A Swept-Sine Technique,”** Presented at the 108th AES Convention, Paris, France, 2000.
- F. Miao, Y. Diange, R. Wang, J. Wen, Z. Wang Dan X. Lian. 2014. **“A Moving Sound Source Localization Method Based On TDOA,”** *Inter-noise*, vol. ., pp. 1-7, 2014.

- H. Khaddour. 2011. **“A Comparison of Algorithms of Sound Source Localization Based on Time Delay Estimation,”** *Elektrorevue, ISSN 1213-1539*, vol. 2, p. 1, April 2011.
- H. Sherman, L. Butler. 2007. **“Transducers and Arrays for Underwater Sound,”** New York: Springer, 2007.
- I. A. McCowan. 2001. **“Microphone Arrays : A Tutorial,”** PhD Thesis. Queensland University of Technology. Australia. 2001.
- J. Ianniello. 1982. **“Time Delay Estimation Via Cross-Correlation In The Presence Of Large Estimation Errors,”** IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Process. 30, 998–1003, 1982
- J. Orchard and Y. Hioka. 2014. **“Localisation Of A Sound Source In Different Positions Using Kinect Sensors,”** Sensors Applications Symposium (SAS), IEEE, Queenstown, 2014, pp. 131-135. doi: 10.1109/SAS.2014.6798932, 2014
- K. Keun-Chang. 2008. **“Sound Source Localization with the Aid of Excitation Source Information in Home Robot Environments,”** IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 54, No. 2, 2008
- L. Xiaofei, S. Miao, W. Wenmin dan L. Hong. 2012. **“Real-time Sound Source Localization for a Mobile Robot Based on the Guided Spectral-Temporal Position Method,”** *International Journal of Advanced Robotic Systems, ISSN 1729-8806*, vol. 9, no. DOI: 10.5772/51307, p. 78, 2012.
- R. J. Urick. 1983. **“Principles of Underwater Sound 3rd Edition,”** New York: Mc Graw Hill, 1983.
- V. Zetterberg, M. I. Pettersson and I. Claesson. 2005. **“Comparison between whitened generalized cross correlation and adaptive filter for time delay estimation with scattered arrays for passive positioning of moving**

**targets in Baltic Sea shallow waters,”** Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, 2005

- Yuwono, N. 2012. **“Analisa Perambatan Suara Bawah Air Sebagai Fungsi Kadar Garam dan Suhu Pada Aquarium Anechoic,”** Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Zhang, Yushi, H. Abdulla, Waleed. 2005. **“A Comparative Study of Time-Delay Estimation Techniques Using Microphone Arrays,”** Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand.

## BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis **Saptian Alfudi Rahman** yang dilahirkan di Mojokerto pada tanggal 5 September 1994 dari ayah bernama Bunadi dan ibu bernama Yuliani. Penulis merupakan anak bungsu dari dua bersaudara. Penulis telah menamatkan pendidikan formal di SDN Mojolebak 2 pada tahun 2006, SMPN 1 Jetis pada tahun 2009, SMAN 1 Gedeg pada tahun 2012. Pada tahun 2016, penulis telah berhasil menyelesaikan gelar sarjana

Strata 1 di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa penulis cukup aktif berorganisasi seperti di HMTF sebagai wakil kepala departemen Riset dan Teknologi dan di Laboratorium Vibrasi dan Akustik sebagai koordinator anggota Laboratorium. Penulis memiliki hobi mendaki gunung dan mengambil tema bidang minat akustik bawah air. Untuk kritikk, saran, atau pertanyaan; penulis dapat dihubungi pada alamat email [saptianrahman@gmail.com](mailto:saptianrahman@gmail.com).